



Diagnóstico de las causas del llenado incompleto en el proceso de fundición y propuesta de mejora para reducir el producto no conforme (PNC) en la empresa JM ESTRADA S.A.

Sebastián Vásquez Molina

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero de Materiales

Tutor

Ricardo Emilio Aristizábal Sierra. Ingeniero Metalúrgico, PhD

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Sebastián Vásquez Molina, 2023)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Vásquez Molina, S (2023). <i>Diagnóstico de las causas del llenado incompleto en el proceso de fundición y propuesta de mejora para reducir el producto no conforme (PNC) en la empresa JM ESTRADA S.A.</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Francisco Javier Herrera Builes

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

1. Resumen	10
2. Abstract	11
3. Introducción	12
4. Planteamiento del problema	14
5. Objetivos	15
5.1. Objetivo General	15
5.2. Objetivos específicos	15
6. Marco teórico	16
6.1. Defectos de fundición	16
6.2. Llenado incompleto	18
6.3. Sistemas de alimentación	20
6.4. Temperatura de colado	22
6.5. Velocidad de Colado	22
6.6. Altura metalostática	23
6.7. Presión metalostática	23
6.8. Fuerza de empuje del molde	25
6.9. El ciclo PHVA	26
7. Metodología	28
8. Resultados	30
8.1. Análisis de producto no conforme comprendido entre los meses de enero y septiembre de 2022.	32
8.2. Cilindro de despulpadora 2,75 3CH	35
8.3. Variables identificadas	42

DIAGNÓSTICO DE LAS CAUSAS DEL LLENADO INCOMPLETO EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN.	4
<hr/>	
8.4. Diagrama de causalidad	42
8.5. Acciones correctivas	43
8.5.1. Diseño del sistema de vaciado	52
8.5.2. Cálculo de la cantidad de kg para el pesado	52
8.5.3. Diseño de chaqueta	55
8.6. Implementación de las acciones correctivas	56
8.6.1. Sistema de vaciado	57
8.6.2. Aumento de pesados junto con chaqueta diseñada	58
9. Análisis de resultados	61
10. Conclusiones	62
11. Recomendaciones	63
12. Referencias	64

Lista de tablas

- Tabla 1. [Variación de las secciones de las partes de los sistemas de alimentación despresurizada.](#)
- Tabla 2. [Fuerzas de empuje de diferentes metales líquidos sobre moldes de arena sílice.](#)
- Tabla 3. [Piezas producidas con su rechazo por llenado incompleto de enero hasta septiembre - 2022.](#)
- Tabla 4. [Composición química del hierro gris ASTM A48 - 20.](#)
- Tabla 5. [Relaciones de colada del sistema de vaciado.](#)
- Tabla 6. [Tiempos de vaciado del Cilindro 2,75 3CH.](#)
- Tabla 7. [Volumen y área superficial de la pieza a fabricar.](#)
- Tabla 8. [Relaciones de colada del nuevo sistema de vaciado.](#)
- Tabla 9. [Resultados de la nueva área de control con 160 kg de pesados y con chaqueta antigua.](#)
- Tabla 10. [Resultados del ensayo del uso de 220 kg de pesados junto con chaqueta nueva.](#)
- Tabla 11. [Análisis comparativo del PNC del defecto de llenado incompleto para los cilindros 2,75 3CH.](#)

Lista de figuras

- Figura 1. [Gráfico del producto no conforme \(PNC\), donde se muestra el seguimiento semanal del defecto de llenado incompleto.](#)
- Figura 2. [Gráfico del producto no conforme \(PNC\), donde se muestran los defectos más representativos y su correspondiente suma en Kilogramos.](#)
- Figura 3. [Representación del defecto de llenado incompleto.](#)
- Figura 4. [Partes de un sistema de alimentación izquierda con la taza de colada y derecha con embudo de colada.](#)
- Figura 5. [Altura metalostática en función del sistema básico de vaciado.](#)
- Figura 6. [Fuerzas ejercidas por metal líquido en un molde de arena.](#)
- Figura 7. [Piezas rechazadas por llenado incompleto en kg.](#)
- Figura 8. [Histórico de ventas de despulpadoras de enero hasta septiembre del 2022.](#)
- Figura 9. [Ilustración de Cilindro 2,75 3CH.](#)
- Figura 10. [Foto despulpadora 2,75 3CH.](#)
- Figura 11. [Dimensiones del cilindro 2,75 3CH en mm.](#)
- Figura 12. [Foto del defecto de llenado incompleto en el cilindro 2,75 3CH.](#)
- Figura 13. [Ilustración del lugar de producción del Cilindro 2,75 3CH.](#)
- Figura 14. [Ilustración del sistema de vaciado del Cilindro 2,75 3CH.](#)
- Figura 15. [Cálculo del tiempo de vaciado para el sistema de vaciado actual.](#)
- Figura 16. [Chaqueta de aluminio agrietada.](#)
- Figura 17. [Diagrama de causalidad.](#)
- Figura 18. [Cálculo del tiempo de vaciado para el nuevo sistema de vaciado.](#)
- Figura 19. [Geometría del canal de distribución.](#)
- Figura 20. [Geometría del canal de alimentación.](#)
- Figura 20. [Geometría del poco de colado.](#)
- Figura 21. [Izquierda\) Ilustración de un bajante. Derecho\) Diferencia entre bajantes rectos y cónico.](#)
- Figura 22. [Estrangulamiento del canal de distribución antes y después.](#)
- Figura 23. [Dimensiones en mm del diseño del sistema de vaciado del cilindro 2,75 3CH.](#)

Figura 24. [Dimensiones del modelo de arena para la HUNTER.](#)

Figura 25. [Medidas en cm de las partes de la chaqueta.](#)

Figura 26. [Izquierda\) fabricación del modelo de madera tanto del molde de arena como de la chaqueta. Medio\) revisión de las medidas del modelo de madera de la chaqueta en el molde de arena. Derecha\) Fabricación de la chaqueta.](#)

Figura 27. [Ilustración del ensayo con la nueva área de control con 160 kg de pesados y con chaqueta antigua.](#)

Figura 28. [Ilustración del uso de los pesados junto con la nueva chaqueta y el resultado al desterronar los moldes.](#)

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PhD	Philosophiae Doctor
PNC	Producto no conforme
AFS	American foundry society

1. Resumen

En el presente informe de prácticas académicas, se planteó una problemática de calidad y la formulación de acciones de mejora, encaminadas a impactar de forma positiva la empresa JM ESTRADA S.A, en un aspecto que bajo el análisis de indicadores de producto no conforme (PNC) se identificó como el defecto de fundición "llenado incompleto", que tiene gran importancia debido a la gran cantidad de kilogramos de piezas defectuosas, y que representa un problema económico. Además, también se expone la metodología utilizada, la cual está bajo el modelo de PHVA cuyo acrónimo significa: Planear, hacer, verificar y actuar, siendo una herramienta muy apropiada para controlar procesos de calidad.

Palabras clave: llenado incompleto, fundición, producto no conforme, calidad.

2. Abstract

In this academic practices report, a quality problem was raised and the formulation of improvement actions, aimed at positively impacting the company JM ESTRADA S.A, in an aspect that under the analysis of quality indicators. nonconforming product (NCP) was identified as the "incomplete filling" casting defect, which is of great importance due to the large number of kilograms of defective parts, and which represents an economic problem. In addition, the methodology to be used is also exposed, which is under the PHVA model whose acronym means: Plan, do, verify and act, being a very appropriate tool to control quality processes.

Keywords: incomplete filling, casting, nonconforming product, quality.

3. Introducción

La Empresa JM ESTRADA S.A, es una empresa colombiana con gran importancia a nivel nacional e internacional, posicionada en el mercado desde hace más de 150 años. Esta empresa se dedica a la producción de piezas y equipos para diferentes sectores agrícolas y mineros, caracterizándose por ser el productor más antiguo en Colombia de equipos que van desde despulpadoras de café, trapiches para la industria panelera, picapastos para la industria agropecuaria, hasta molinos californianos usados en minería. En general todos esos equipos se producen en distintas aleaciones de hierro según las piezas que se requieran para la fabricación de cada uno, estas comprenden: Hierro gris, nodular y blanco, siendo el primero el más usado, y aleaciones de latón y bronce para ciertas piezas en particular que requieren de unas propiedades diferentes.

La empresa cuenta con una fábrica situada en La Estrella, Antioquia - Colombia, donde se tiene la planta de fundición encargada de suministrar las piezas a las diferentes líneas de servicio que ensamblan los productos mencionados anteriormente, la planta de fundición tiene como meta mínima semanal un promedio de 14 toneladas fundidas, lo que hace un total de 770 toneladas fundidas al año, en la fábrica también se cuenta con talleres metalmecánicos, oficinas, almacén y demás instalaciones auxiliares.

Teniendo en cuenta la producción considerable en la planta de fundición de la empresa JM ESTRADA S.A., es evidente considerar que todo proceso que tenga gran producción, el control de la calidad se vuelve mucho más difícil de manejar, por tanto, implementar un buen sistema de calidad es de gran importancia para mejorar la producción y seguir ofreciendo productos con altos estándares de calidad.

4. Planteamiento del problema

JM ESTRADA S.A actualmente presenta una serie de inconvenientes relacionados con los procesos productivos necesarios para su actividad económica, los cuales son principalmente en el material (hierro gris ASTM A48 CLASE 20) lo que conlleva al aumento del PNC (Producto No Conforme) por defectos principalmente como el llenado incompleto, deformaciones de la pieza, poros y alta dureza en el material. Esto se evidenció revisando los reportes semanales del sistema de gestión de calidad (SGC) y en diálogo con algunos trabajadores de la planta (ver figura 1), siendo un problema muy recurrente en este año 2022, debido a que solo en este año se implementó el sistema de gestión de calidad, siendo una herramienta muy valiosa en la cuantificación de los defectos de fundición. Finalmente, este problema de calidad afecta negativamente el cumplimiento de indicadores de calidad y metas de producción.

Según los datos reportados por el sistema de gestión de calidad, los indicadores de PNC para el año 2022 (ver figura 2), se puede apreciar en kg de piezas imperfectas todos los defectos que van del año, donde es evidente una alta concentración en el defecto de llenado incompleto con 6,2 toneladas de peso en piezas defectuosas, de aquí radica la necesidad de identificar y presentar una acción de mejora a las causas actuales que están dando como resultado una pérdida económica considerable debido a un atraso en la productividad por falta de suministro de las piezas hacia las líneas de servicio, ya que estas piezas con este defecto difícilmente se pueden reprocesar (corregir) para luego pasar a los procesos subsiguientes hasta llegar a la obtención del producto final.

Figura 1

Gráfico del producto no conforme (PNC), donde se muestra el seguimiento semanal del defecto de llenado incompleto.

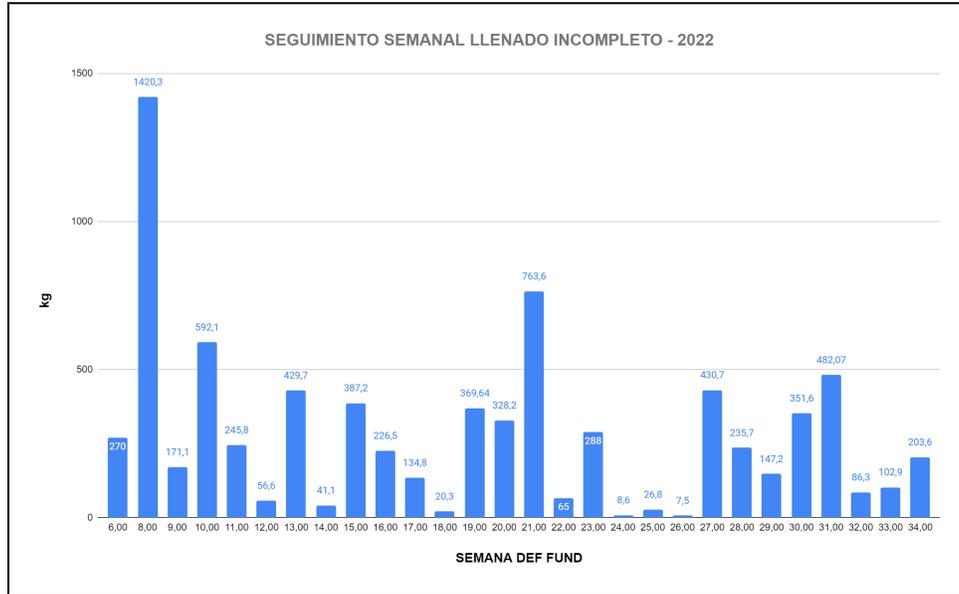
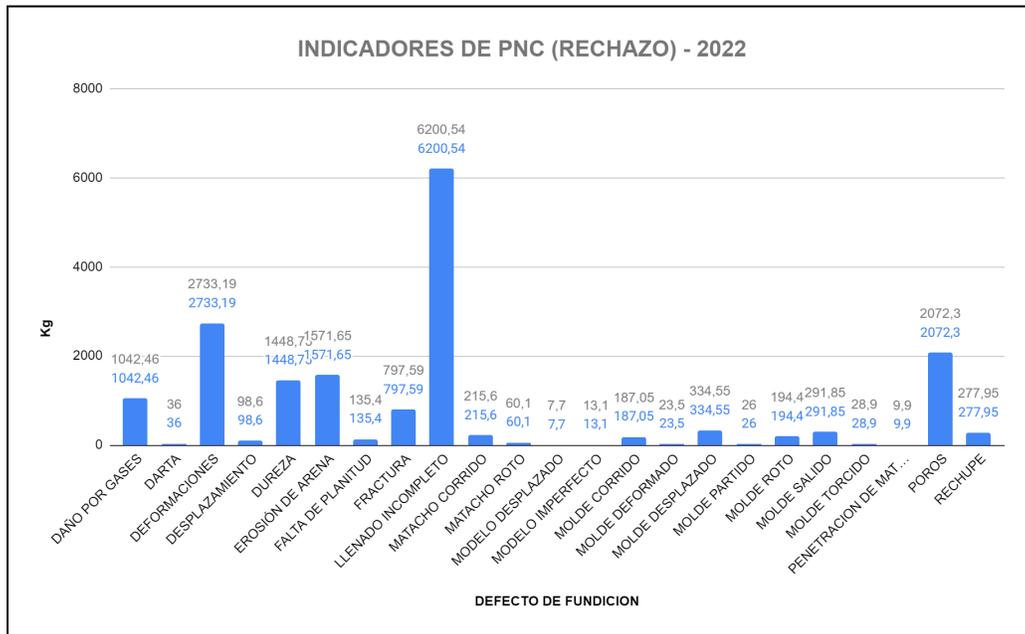


Figura 2

Gráfico del producto no conforme (PNC), donde se muestran los defectos más representativos y su correspondiente suma en Kilogramos.



5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Realizar un diagnóstico de las causas asociadas al llenado incompleto en las piezas más representativas de la empresa JM ESTRADA S.A, proponiendo acciones de mejora que busquen reducir los índices de PNC a causa de este defecto validando la eficacia de las acciones propuestas.

5.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico preliminar del producto no conforme en lo que va del año 2022, que permita identificar las piezas más afectadas por el llenado incompleto y las causas que lo originan.
- Determinar todas las variables implicadas en el proceso de fundición del hierro gris que tengan influencia en el llenado de la pieza final.
- Realizar un diagrama de causalidad que evidencie el porqué de las no conformidades de llenado incompleto con sus respectivas propuestas de mejoramiento.
- Definir acciones de mejora según se identifiquen las causas que afectan negativamente la fundición del hierro gris, de tal forma que contrarresten el PNC.

6. Marco teórico

6.1. Defectos de fundición

Los defectos de fundición que aparecen en las piezas fundidas tienen una alta probabilidad de incidencia debido a que algún punto del proceso no ha sido completamente estandarizada y controlada. El proceso completo de fundición que abarca subprocesos como la fusión, vaciado, solidificación, moldeo etc., tiene en sí, muchas variables a controlar para tener unas piezas fundidas libres de defectos, llegando a ser imposible tener un control perfecto sobre ellos (Serrano Lledó, n.d.).

Estos defectos de fundición por otro lado se pueden ver como algo positivo desde el punto de vista del aprendizaje, ya que, estos necesitan ser investigados y comprendidos, llegando hasta la raíz de las causas para poder ser solucionados permitiendo una reducción de material, de tiempo de trabajo que se traducen finalmente en dinero.

Dicho esto, es muy importante que cada planta de fundición se interese por reducir la cantidad de piezas defectuosas, por esto es importante llevar a cabo una inspección de las piezas fundidas después de cada colada, esto lo hace el jefe responsable del área de fundición o los mismos operarios, interesados en: diagnosticar los defectos, identificar las causas, evaluar las piezas defectuosas en peso y porcentaje respecto a la producción total y registrarlos en una base de datos estadístico de la producción.

La identificación correcta de los defectos es una tarea difícil, que necesita por parte de quien la realiza, una gran experiencia en el mundo de la fundición, debido a que un mal diagnóstico de un defecto puede ser el punto de partida para la aparición de un defecto de otra naturaleza. Los defectos en el mundo de la fundición son muy variados, así como son las causas que los propician, por esto se entiende la ardua tarea que es lograr una clasificación exitosa, por ahora se identifican los defectos que son detectables a simple vista o superficiales y los defectos internos que no pueden ser visibles (Serrano Lledó, n.d.).

En las piezas defectuosas de fundición son comunes los siguientes defectos:

Defectos visibles:

- De forma; como deformaciones, hundimientos, empujes, rebabas y desplazamiento de las cajas.
- Superficiales; rugosidades, hinchazones, abombamientos, penetraciones, exfoliaciones, inclusiones de arena y darts.
- De la pieza; piezas no llenas y discontinuidades, escapes de metal, hendiduras, grietas y roturas.

Defectos no visibles:

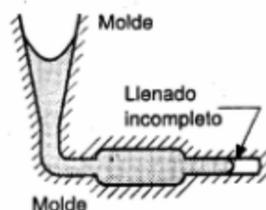
- Falta interna de continuidad; como porosidades, pequeños agujeros, burbujas, sopladuras, rechupes, contracciones, meniscos, tensiones y grietas.
- Composición química y estructura errónea; como temple difuso, temple localizado, temple inverso, estructura abierta o gruesa y segregaciones de grafito (Serrano Lledó, n.d.).

6.2. Llenado incompleto

Las piezas con falta de llenado (ver figura 3), se presentan cuando el metal, por una razón cualquiera, no llena del todo el molde, dando paso a las discontinuidades, cuando en una zona cualesquiera hay una interrupción total o parcial. El defecto se manifiesta también bajo forma de grieta o bordes redondeados, y puede tener orígenes muy diferentes, como elementos de colada mal diseñados, exceso de humedad, salida de aire y gases insuficiente, metal frío, composición química equivocada, carga metalostática insuficiente, etc (Serrano Lledó, n.d.).

Figura 3

Representación del defecto de llenado incompleto.



Nota. Fuente (Serrano Lledó, n.d.).

6.3. Sistemas de alimentación

Para obtener piezas sin defectos internos y superficiales se deberá controlar el ingreso o la forma como el metal líquido ingresa a los moldes mediante el diseño de un buen sistema de alimentación, que deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

- Al ingresar el metal fundido dentro del molde este lo hará con el mínimo de turbulencia, para evitar el ingreso del aire y la formación de burbujas, lo cual es causa de oxidaciones.
- En su interior el metal fundido será dirigido por el número de canales de alimentación suficientes de tal forma que el metal fundido se distribuye por toda la pieza y se pueda crear gradientes de temperatura tanto en el metal como en las superficies del molde, esto con propósito de que la solidificación se da progresivamente evitando la formación de los rechupes, poros y fallas en el interior de las piezas fundidas (Titov & Stepanov, 1981, 148).
- Cuando no se llena por completo el sistema de alimentación, así, por ejemplo: sí el estrechamiento del bebedero se realiza con un cambio brusco de la sección transversal, aparecen turbulencias; o sí se utiliza sistemas no presurizados, esto obliga a agrandar las secciones de los canales de distribución y alimentación, lo cual provoca alguna turbulencia y deficiencia en el llenado.

Teniendo en cuenta estas limitaciones, es necesario dar ciertas sugerencias como son:

- Durante el colado, la altura entre la cuchara y el molde debe ser lo más pequeña posible. Se recomienda utilizar la taza de colada.
- La posición del canal de alimentación debe ser tal que evite la falta de metal líquido en la cavidad del molde, lo que requiere llenar el molde desde abajo.
- El metal fundido debe mantenerse en contacto con el molde, principalmente porque el caudal debe ser alto para evitar la formación de zonas de baja presión y burbujas de aire.
- El caudal de metal después de la entrada debe reducirse para llegar al canal de entrada a baja velocidad para evitar turbulencias en la cavidad (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Durante el llenado, la energía potencial en el interior es convertida en energía cinética, la velocidad del metal aumenta, alcanzando su máxima velocidad en la base del bebedero. Para evitar turbulencias y arrastre de espuma, es necesario la utilización de sistemas despresurizados cuyas secciones de paso del metal líquido deben dar cumplimiento a las siguientes relaciones: Donde FA es la sección total del o de los canales de alimentación, FD del canal de distribución y FB del bebedero como se muestra en la tabla 1. (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Tabla 1

Variación de las secciones de las partes de los sistemas de alimentación despresurizada .

FB	FD	FA
1	2	3
1	2	4
1	1	6
1	2	2
1	2.4	2.4
1	2.6	3.3
1	2.7	3.6

Nota. Fuente (Titov & Stepanov, 1981, 156-158)

De la tabla número 1, se puede observar tres relaciones de las secciones que componen el sistema de alimentación, cuya sección total en FB y FD son iguales y su única diferencia es la sección total en FA, para más claridad en la utilización de cualquiera de estas tres relaciones, es importante tener en cuenta que la sección total FA en un sistema despresurizado es la que controla la calidad del flujo, la cual tiende a ser laminar debido a la característica de los diseños despresurizados por tener una presión baja en los ataques, por tanto mientras mayor sea la sección total en FA más se garantiza el flujo laminar, es decir un flujo sin turbulencias, este diseño es de gran utilidad para materiales que tienen una alta tendencia a la oxidación y/o para reducir la erosión de arena en el vaciado.

Partes de un sistema de alimentación

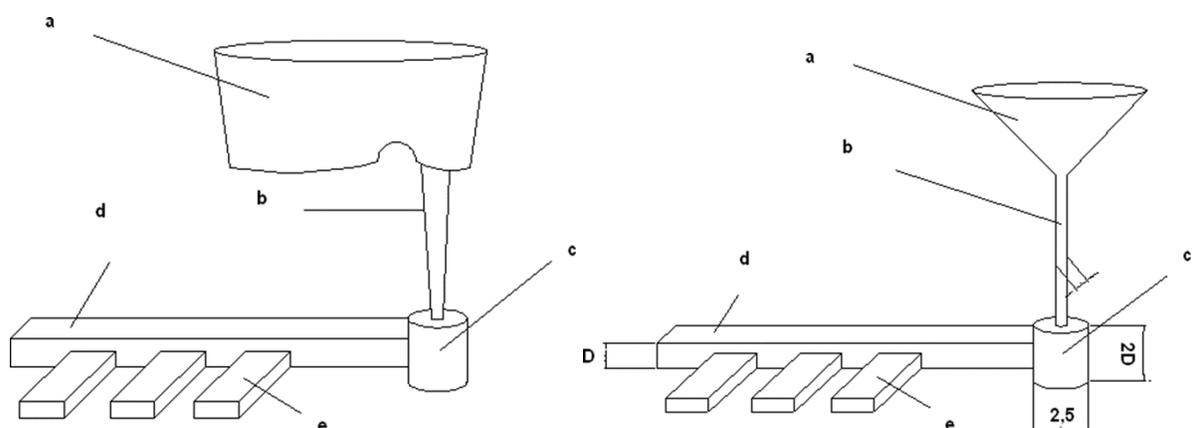
Como se observa en la figura 4, las partes de un sistema de alimentación son:

- a) Taza de colado.

- b) Bajante
- c) Pozo de colado.
- d) Canal de distribución.
- e) Canales de alimentación.

Figura 4

Partes de un sistema de alimentación izquierda con la taza de colada y derecha con embudo de colada .



Nota. Fuente (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Taza de colada

Su objetivo principal es recibir el chorro de metal fundido y mantener constante el flujo en su interior, evitando el ingreso de escoria para evitar defectos en la pieza fundida, es necesario que el embudo de vaciado se encuentre lleno de metal líquido durante el vaciado para que el llenado de la pieza sea completo (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Bajante

Aquí la corriente de metal fundido fluye hacia abajo, el interior del canal debe ser más estrecho para crear una presión positiva en el sistema de alimentación (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Pozo de colada

Ubicado debajo del bajante, su función principal es expulsar el aire que ingresa al inicio de la colada y facilitar un suministro continuo de metal líquido a los canales de distribución y subida (Titov & Stepanov, 1981, 156-158).

Canal de Distribución

Es el canal que logra conducir el metal líquido a los diferentes lugares donde se localizan los canales de alimentación. Tiene como principal objetivo frenar al líquido y contener la espuma de óxido. La sección transversal del canal de distribución se debe hacer de forma trapezoidal de tal forma que su ancho sea igual a su altura (Aluminio de Galicia S.A, n.d., 15)

Canales de alimentación

Los canales de alimentación conducen uniformemente el metal líquido a la cavidad del molde, dicho suministro debe ser de forma suave, “se encuentran situados en los puntos de más profundidad y menor espesor de la pieza” (Herrera, 1991), “además, la sección de los alimentadores debe permitir que la temperatura del metal fundido no descienda demasiado en el trayecto del canal de distribución a la moldura” (Aluminio de Galicia S.A, n.d., 15-16).

6.4. Temperatura de colado

Una buena temperatura de colado debe ser seleccionada de acuerdo con las condiciones de proceso de colado, las características del molde y propiedades del metal.

Al tener el metal fundido a una temperatura baja, por lo general se dificulta la disolución de gases, el metal líquido disminuye su fluidez y no puede llenar todas las zonas del molde, puede solidificarse en los bebederos y canal de alimentación. Si la temperatura de colado es elevada esta puede producir una gran disolución de gases que provocan la formación de burbujas en el colado, las mismas que si no logran escapar del interior de la pieza de colado, ocasiona la aparición de sopladuras y picaduras. Igualmente, debido a que el metal experimenta una mayor contracción se favorece la formación de rechupes (Streeter y Wylie, 2000).

6.5. Velocidad de Colado

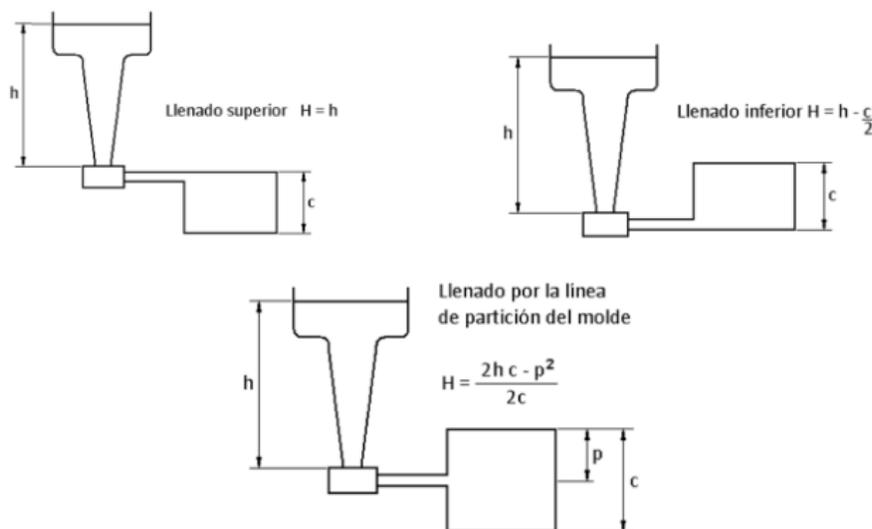
Para que la pieza esté libre de hundimiento y porosidad, la velocidad de colado tiene un efecto significativo sobre la misma. Trabajar a altas velocidades de vaciado crea un flujo turbulento que promueve remolinos y captura los gases liberados por el molde a medida que se entra en contacto con el metal caliente. La baja velocidad ayuda a que el metal permanezca en contacto con el aire por más tiempo, lo que permite que ocurran reacciones de oxidación, cuyos productos son atrapados por la fundición y crean porosidad; también promueve el endurecimiento prematuro y la aspereza en toda la superficie de la fundición (Streeter y Wylie, 2000)..

6.6. Altura metalostática

La altura metalostática o también conocida como la altura de presión efectiva (EPH), es una función de los efectos de la energía potencial sobre el flujo de los fluidos. La altura metalostática perturba enormemente los patrones de flujo y la velocidad del metal. Para los sistemas de colada vertical y horizontal se tienen diferentes comportamientos de flujo y velocidad del metal, contando para el sistema de colado horizontal un caudal que se declina y las velocidades del metal disminuyen durante el llenado en la parte superior del molde, mientras que en el sistema de colado vertical, las velocidades son disímiles en los distintos niveles de la colada. a continuación se muestran las ecuaciones para el cálculo de la altura metalostática para los tres sistemas de colada, se muestran en la siguiente figura.

Figura 5

Altura metalostática en función del sistema básico de vaciado..



Nota. Fuente (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011)

6.7. Presión metalostática

Cuando el molde se encuentra lleno de metal en estado líquido, aparece en la masa metálica una presión p , la misma para cada cada punto, donde según el principio de Pascal, ejerce igualmente en todas las direcciones y que depende de la profundidad o altura h , del punto considerado bajo el nivel del líquido y del peso específico del metal. Cuando se cuele o, dicho de otra manera, cuando se vacía el metal líquido en el interior del molde suceden una serie de fenómenos físicos, tales como:

- Durante el vaciado, el metal en estado líquido, transita por el interior del sistema de vaciado, llenado el molde, dicho líquido impacta contra las paredes del molde y sigue su camino con cierta turbulencia, en este proceso es fácil y probable que se originen erosiones.
- Posterior al vaciado y sin solidificar el metal, el líquido ejerce a cada una de las paredes del molde y sobre los matachos que se encuentran en el interior del molde una presión metalostática.

- Finalmente, cuando el metal se solidifica para dar forma a la pieza, se inicia el proceso de contracción volumétrica y dura hasta alcanzar la temperatura del ambiente.
- Cuando se llena el molde con metal líquido, se crea una presión p en el bloque de metal, que es la misma para cada punto, según el principio de Pascal, esta presión se aplica por igual en todas las direcciones y está fuertemente relacionada con la profundidad h del punto debajo del nivel del líquido y la gravedad específica del metal líquido (Goyo Perez, 2010)]

6.8. Fuerza de empuje del molde

Es la fuerza de empuje en el molde cuando el metal líquido se llena por completo con un núcleo o matacho de arena, estos tienden a flotar y debemos mantenerlos en la misma posición. A continuación, se pueden apreciar diferentes fuerzas de empuje en la tabla 2.4, generados por varios metales en estado líquido en moldes de arena sílice, representada como una proporción del peso del núcleo:

Tabla 2

Fuerzas de empuje de diferentes metales líquidos sobre moldes de arena sílice.

Metal líquido	Proporción de la fuerza de empuje al peso del núcleo
Aluminio	0.66
Latón	4.25
Cobre	4.50
Hierro vaciado	3.50
Acero	3.90

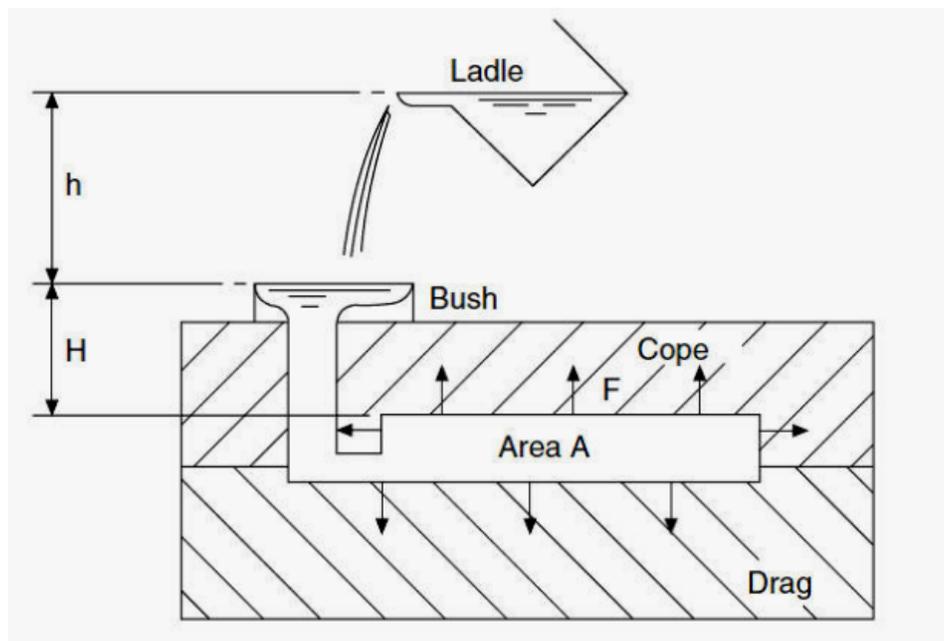
Nota. Fuente (Benavidez, 2011)

A menos que el molde esté debidamente sostenido o equilibrado, la fuerza ejercida por el metal fundido puede abrir el molde y permitir que el metal se escape o causar otros problemas como distorsión de la pieza final o el levantamiento de la arena. La presión máxima sobre la tapa está relacionada con la presión metalostática del metal fundido debido a la altura de alimentación

(H) sobre la tapa del molde. Además, existen otras fuerzas al llenar el molde con metal líquido, como se muestra en la Figura 6, que hace que la parte superior del molde se levante y/o pierda metal a través de la unión entre la parte superior y la inferior del molde.

Figura 6

Fuerzas ejercidas por metal líquido en un molde de arena.



Nota. Fuente (Benavidez, 2011)

Debido a la dificultad para calcular esta fuerza de empuje, se toma en cuenta un factor de seguridad del 50% de la fuerza metalostática. La fuerza de apertura se calcula a partir del área total en la parte superior en contacto con el metal (esto incluye el área de todas las cavidades dentro del molde) (2). La fuerza es la siguiente:

$$F(kgf) = \frac{A * H * d * 1,5}{1000} \text{ Ec. \#1}$$

Donde: A es el área de la parte superior del molde en cm², H (cm) es la altura del alimentador que sobresale de la altura de la parte superior del molde, d es la densidad del metal fundido (g/cm³) y el 1.5 es el factor de seguridad.

La fuerza con la que el núcleo o matacho tiende a flotar en medio del metal líquido, se calcula con (2):

$$3,5 * W(kgf) \text{ Ec. \#2}$$

Donde: W es el peso del núcleo (kg) y el 3.5 es la fuerza que ejerce el metal líquido (ver tabla 2). Por lo tanto, cuando se realizan fundiciones de piezas grandes no es de extrañarse que los moldes sean grandes, pesados y se utilicen contra pesos para evitar problemas relacionados por la presión metalostática.

6.9. El ciclo PHVA

El ciclo PHVA, o Ciclo de Mejora Continua, es una herramienta de gestión desarrollada por el estadístico estadounidense Edward Deming en la década de 1950. Las siglas del ciclo PHVA forman un acrónimo formado por las iniciales de las palabras Planificar, Hacer, Verificar y Actuar, correspondiendo cada uno de estos 4 términos a una fase o etapa del ciclo (*ISOTools*, 2015)].

- **Planificar:** En esta fase, se definen los objetivos y los medios para alcanzarlos en función de las políticas de la organización y las necesidades del cliente. Es útil para convocar grupos de trabajo, escuchar a los empleados y utilizar herramientas de planificación como: 5W2H en la cual se responden 7 preguntas claves cuyas palabras en inglés inician con W y H : ¿Qué (What), ¿Por qué (Why), ¿Cuándo (When) ¿Dónde (Where) ¿Quién (Who), ¿Cómo (How) y ¿Cuánto (How much), recordar que esta fase es muy importante y permite que las otras fases se desarrollen, demostrando que si no planificamos bien, los resultados de las otras tres fases serán poco fiables.

- **Hacer:** Este es el contenido del plan de ejecución, en esta etapa se recomienda realizar pruebas piloto antes de implementar el proceso definido. Durante el desarrollo, se pueden descubrir problemas de implementación e implementar oportunidades de mejora.
- **Verificar:** En esta fase, verificamos que los objetivos del programa se estén logrando a través de procesos de monitoreo y medición, confirmando que son consistentes con la política y los planes originales.
- **Actuar:** En este paso, se toman medidas para mejorar el rendimiento del proceso, corregir desviaciones, estandarizar cambios, realizar la capacitación y los ejercicios necesarios y determinar cómo se monitorea (Sanchez, 2022).

Esta herramienta es fácil de usar y, cuando se usa correctamente, puede ayudar mucho a mantener las tareas organizadas y eficientes. Al incorporar la filosofía establecida por el ciclo PHVA, las organizaciones obtienen una guía básica para la gestión de procesos y proyectos (*ISO 9001*, 2022).

7. Metodología

Las siguientes actividades hacen parte de la metodología usada para lograr los objetivos planteados:

- **Inducción a la empresa JM ESTRADA S.A:** Para conocer la historia de la empresa, su estado actual en el mercado, sus retos, hacia dónde se dirigen y sus instalaciones.
- **Revisión Bibliográfica:** Se realizará una búsqueda bibliográfica durante todo el proceso de aprendizaje con el fin de conocer y comprender las distintas variables de proceso de fundición y de cómo éstas pueden repercutir en el estado final de las piezas fundidas cuando no se manejan adecuadamente.
- **Visitas a la planta:** Las visitas a la planta de fundición se llevarán a cabo de forma diaria durante todo el proceso de aprendizaje, debido a que será este el escenario principal de trabajo, allí se hablarán con los operarios quienes brindarán información de primera mano acerca de las variables de proceso de fundición, permitiendo identificar las posibles causas del defecto de llenado incompleto complementando la información suministrada con la búsqueda en la literatura, también se inspeccionará visualmente de forma semanal las piezas defectuosas con el fin de llevar un registro del producto no conforme.
- **Manejo de bases de datos:** El manejo de las bases de datos se hará en paralelo con las visitas a la planta, pues de los datos obtenidos en las visitas a la planta de fundición se alimentan las bases de datos del sistema de gestión de calidad, pues allí se cargan los registros del producto no conforme, proporcionando datos estadísticos de los defectos de fundición y específicamente del seguimiento del defecto de llenado incompleto como de las piezas más afectadas con este defecto.
- **Planteamiento de la propuesta:** Se elaborará una propuesta escrita donde se identifique cual es la problemática o necesidad de la empresa en el periodo de práctica, se definirán los objetivos, el marco teórico, la metodología, el cronograma de actividades y los resultados que se esperan obtener.
- **Acciones correctivas para eliminar el problema:** Una vez identificadas todas las variables de proceso que tienen lugar en una correcta y completa conformidad de la pieza

final, así como de las piezas más afectadas por este defecto, se dispone realizar un diagrama de causalidad del problema e implementar todas las acciones correctivas para contrarrestar el llenado incompleto de las piezas de fundición.

- **Verificación de la efectividad de las acciones correctivas:** Una vez realizadas todas las acciones correctivas se procede a evaluar el impacto de las mismas, analizando el indicador de (PNC).
- **Retroalimentación de acciones correctivas:** Una vez evaluadas las distintas acciones de corrección, se tomarán en cuenta las acciones que más impacto hayan tenido en la reducción de los indicadores de producto no conforme (PNC) así como también de la estandarización de las acciones correctivas en las demás piezas afectadas.
- **Informe final:** informe escrito donde se publicarán los resultados obtenidos bajo la metodología planteada.

8. Resultados

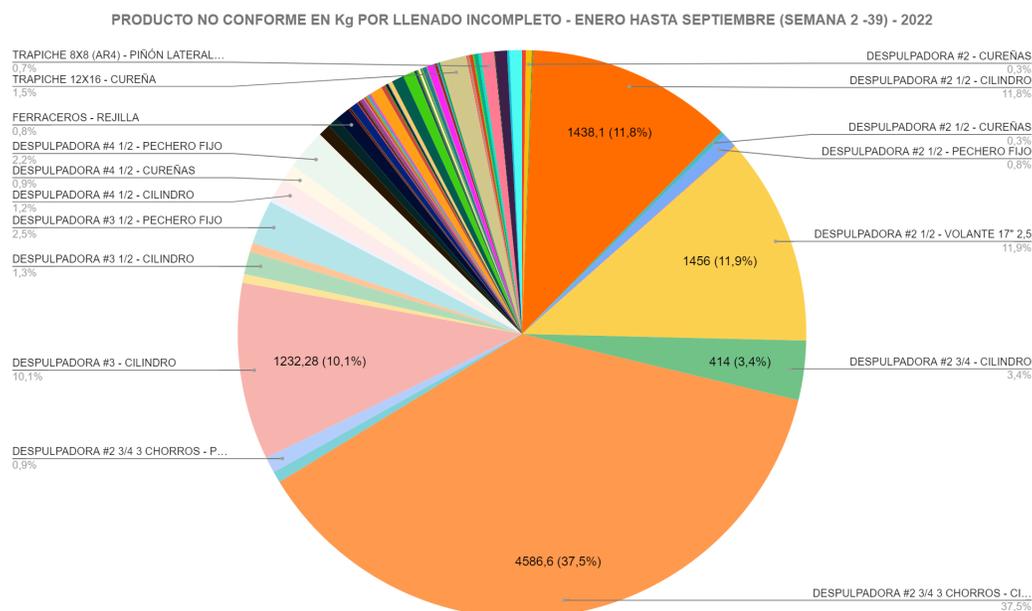
8.1. Análisis de producto no conforme comprendido entre los meses de enero y septiembre de 2022.

Una vez realizado el diagnóstico de las salidas no conformes en un periodo comprendido entre los meses de enero hasta septiembre del año 2022, al ver la figura 7, es evidente encontrar múltiples piezas con una cantidad elevada de rechazo por el defecto de llenado incompleto, dentro de las cuales se destacan en orden de mayor a menor cantidad de kg rechazados las siguientes piezas de fundición:

- Cilindro de despulpadora No 2,75 3CH
- Volante de despulpadora 17"
- Cilindro de despulpadora No 2,5.

Figura 7

Piezas rechazadas por llenado incompleto en kg.



Consultando la base de datos del sistema de calidad tenemos los siguientes datos para evaluar de forma cuantitativa cual pieza es la más crítica, encontrándose los siguientes datos:

Tabla 3

Piezas producidas con su rechazo por llenado incompleto de enero hasta septiembre - 2022.

Pieza fundición	Número de piezas fabricadas	Número de piezas rechazadas	% Rechazo
CILINDRO 2,75 3CH	1762	316	17,93%
CILINDRO 2,5	1049	136	12,96%
VOLANTE 17" 2,5	3500	209	5,97%

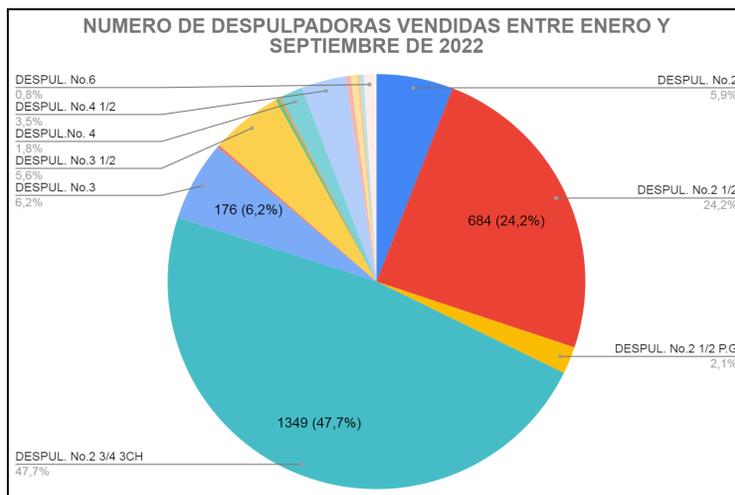
Como resultado tenemos que el porcentaje de rechazo para el cilindro 2,75 3CH es el más alto con respecto a las otras dos piezas evaluadas, siendo esta la pieza con más necesidad de tomar acciones correctivas para disminuir su porcentaje de rechazo.

Análisis de ventas

Analizando el histórico de ventas de la empresa JM ESTRADA S.A igualmente comprendido desde enero hasta septiembre de 2022, es notorio ver que casi la mitad de las ventas de la línea de despulpadoras son para el equipo despulpadora 2,75 3CH, convirtiéndose en el equipo de mayor rotación en la fábrica.

Figura 8

Histórico de ventas de despulpadoras de enero hasta septiembre del 2022.



Por ende con este análisis de las ventas de despulpadoras se puede corroborar con la figura 8, los diferentes diagnósticos de las salidas no conformes realizados anteriormente, donde se prioriza según el defecto de llenado incompleto la pieza “CILINDRO DE DESPULPADORA 2,75 3 CH” por encima del “CILINDRO DE DESPULPADORA NO 2,5”, siendo la primer pieza la más crítica.

8.2. Cilindro de despulpadora 2,75 3CH

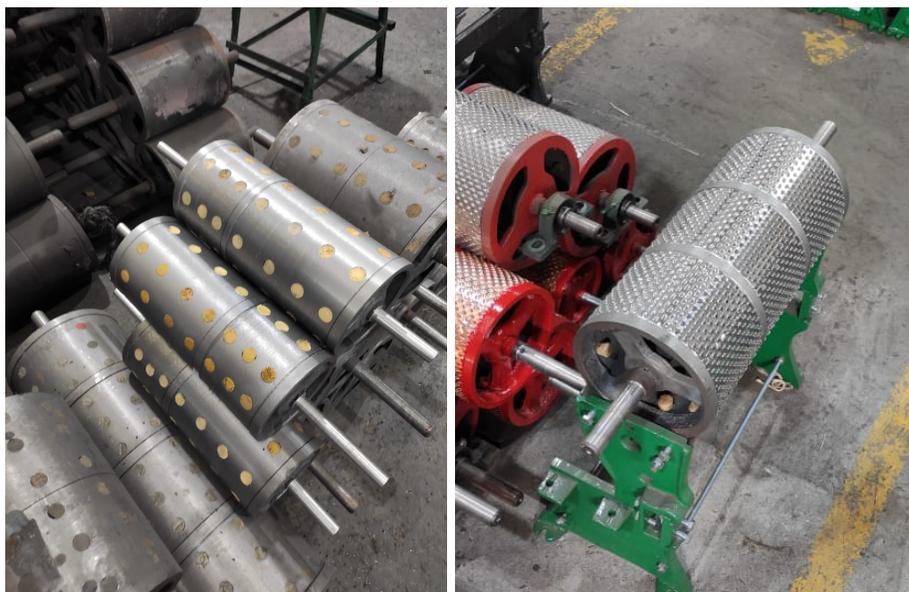
Descripción del uso

Los cilindros de despulpadora en general, tienen un uso de vital importancia en la funcionalidad de los equipos de despulpadora, estos cilindros después de todo el proceso de mecanizado se someten a un proceso de tarugado que consiste en la perforación por todo el cuerpo del cilindro (ver figura 9), con el fin de introducir unos cuerpos de madera en dichos orificios, que sirven como punto de anclaje de las láminas de acero inoxidable, de tal forma que la lámina queda envolviendo el cilindro, este proceso se conoce como el encamisado del cilindro

de despulpadora, esta lámina cuenta con una superficie rugosa que permite el despulpado del grano de café, (ver figura 9).

Figura 9

Ilustración de Cilindro 2,75 3CH



Los cilindros de despulpadora son huecos y tienen en su interior un eje que va sujeto por unos cruceros unidos al cuerpo del cilindro. El cilindro por medio del eje se acopla a las cureñas que dan cuerpo al equipo y frente al cilindro e igualmente alojado en las cureñas se tiene el pechero, de tal forma que cuando gira el cilindro de despulpadora este se encuentra muy próximo al pechero generando una fricción en el grano de café cuando este entra en el equipo por la tolva superior que alimenta la despulpadora, logrando la separación de la cáscara del grano del café, finalmente el pechero tiene venas o caminos por donde sale el grano de café completamente separado de la cáscara de café listo para sus procesos siguientes (ver figura 10).

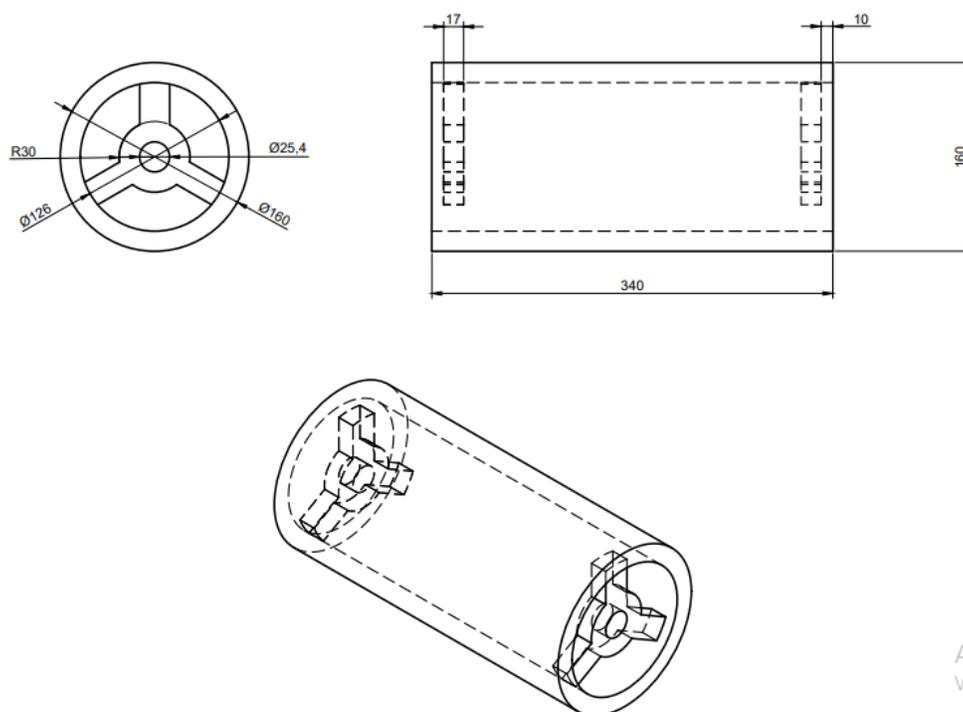
Figura 10

Foto despulpadora 2,75 3CH.



Figura 11

Dimensiones del cilindro 2,75 3CH en mm.



Act
Ve a

Peso del cuerpo del cilindro: 18,5 Kg

Peso con el eje: 20,65 kg

peso del sistema de alimentación: 5,3 Kg

peso total a vaciar: 42,3 kg

Material usado.

Para la fabricación de los cilindros de despulpadora 2,75 3 CH y en general para todos los demás cilindros de despulpadora fabricados en JM ESTRADA S.A, se utiliza como material de fabricación el hierro gris estandarizado bajo la norma ASTM A48 clase 20, dicha elección de material de fabricación ofrece ventajas en cuanto a la fácil maquinabilidad de la pieza en comparación con el hierro nodular que cuenta con unas propiedades mecánicas muy superiores al hierro gris utilizado, pero que para las prestaciones requeridas para la pieza de estudio no son necesarias. La figura 12 muestra imágenes representativas del defecto de llenado incompleto para el cilindro en cuestión.

Tabla 4

Composición química del hierro gris ASTM A48 - 20.

Clase	%C	%Si	RT(psi)	Dureza HB	Microestructura
20	3,40-3,60	2,30-2,50	24K	130-180	Ferrita+Grafito

Figura 12

Foto del defecto de llenado incompleto en el cilindro 2,75 3CH.



8.3. Variables identificadas

- **Diseño del sistema de vaciado antiguo.**

El cilindro de despulpadora 2,75 3 CH es una pieza que se encuentra montada en una placa modelo de aluminio con unas dimensiones de 59 x 70 cm con un espesor de 2 cm, la cual se moldea en una prensa semiautomática HUNTER, que para las condiciones de operación actuales en la empresa JM ESTRADA S.A cuenta con una productividad de 50 moldes en un día de trabajo en un turno de 9 horas, esta placa cuenta con la capacidad de producción de dos piezas por molde, por ende el sistema de vaciado usado actualmente alimenta dos piezas, es decir dos cilindros de despulpadora.

Figura 13

Ilustración del lugar de producción del Cilindro 2,75 3CH.

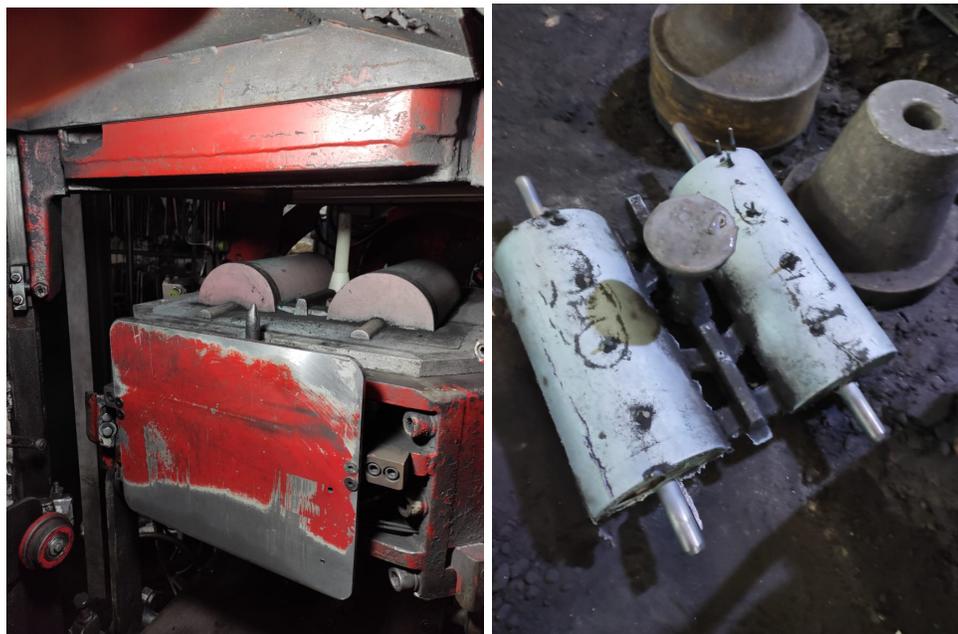


Figura 14

Ilustración del sistema de vaciado del Cilindro 2,75 3CH.

El sistema de vaciado que se usa actualmente tiene las siguientes áreas transversales:

Tabla 5

Relaciones de colada del sistema de vaciado.

Relación de colada (As : Ac: Au) 1 : 2,22 : 3,37	
Área inferior del bajante	$5,81 \text{ cm}^2$
Área canal de distribución	$12,94 \text{ cm}^2$
Área canal de distribución estrangulado	$10,44 \text{ cm}^2$
Área canal de alimentación o ataques	$19,6 \text{ cm}^2$

De estas medidas podemos concluir que el área transversal del bajante es la sección de control de vaciado, encontrándose la relación de áreas mostrada en la tabla anterior.

Según las relaciones de áreas encontradas en el sistema de vaciado usado para los cilindros de despulpadora 2,75 3 CH, encontramos que es un sistema de alimentación despresurizado debido a que el área transversal total en los canales de alimentación es mucho

mayor que las áreas transversales tanto del bajante como de canal de distribución, esto quiere decir que el sistema de vaciado sí tuvo una base técnica para su diseño, sin embargo se puede apreciar algunas falencias, como lo es el tipo de bajante, en este caso es recto, que presenta un factor de pérdida de flujo mayor, si lo comparamos con los de tipo ahusados, es decir, estos últimos evitan la aspiración de aire y turbulencia permitiendo el flujo más fácil, así como de la falta de uso de canales de distribución escalonados que ayudan a un vaciado más uniforme.

- **Temperatura de vaciado**

La temperatura de vaciado para los cilindros de despulpadora 2,73 3CH se encuentra en un rango que va desde los 1360 °C hasta los 1290°C, es decir, no se cuenta actualmente con una temperatura estandarizada, esto trae muchos problemas a la hora del vaciado, una temperatura de vaciado demasiado alta provoca que el metal líquido se escurra por en medio del molde de arena y provoque una descompensación de la cantidad de metal líquido en el interior y por otro lado una temperatura de vaciado demasiado baja no permite el llenado completo de la pieza debido a la solidificación del material en el transcurso del llenado.

- **Tiempo de vaciado**

El tiempo de vaciado de los cilindros de despulpadora 2,75 3 CH es algo muy variable que depende en esta situación exclusivamente del vaciador asignado, ya que el sistema de alimentación con el que se cuenta no se sabe si está diseñado de forma técnica por ende se desconoce de forma exacta el tiempo de llenado apropiado para el sistema, trayendo esto como consecuencia, que por medio de la experiencia empírica de los vaciadores se concluya un tiempo promedio de vaciado, a continuación se muestra una tabla con los tiempos de vaciado registrados dependiendo del vaciador:

Tabla 6

Tiempos de vaciado del Cilindro 2,75 3CH.

No. moldes vaciados	Tiempo de vaciado, vaciador No 1 (Seg)			Tiempo de vaciado, vaciador No 2 (Seg)		
	1	53	51	50	42	46
2	50	58	53	45	43	47
3	49	55	51	40	44	45
4	45	49	49	41	40	42
5	41	47	46	35	39	37
Tiempo promedio	47,5	52	49,8	40,6	42,4	43

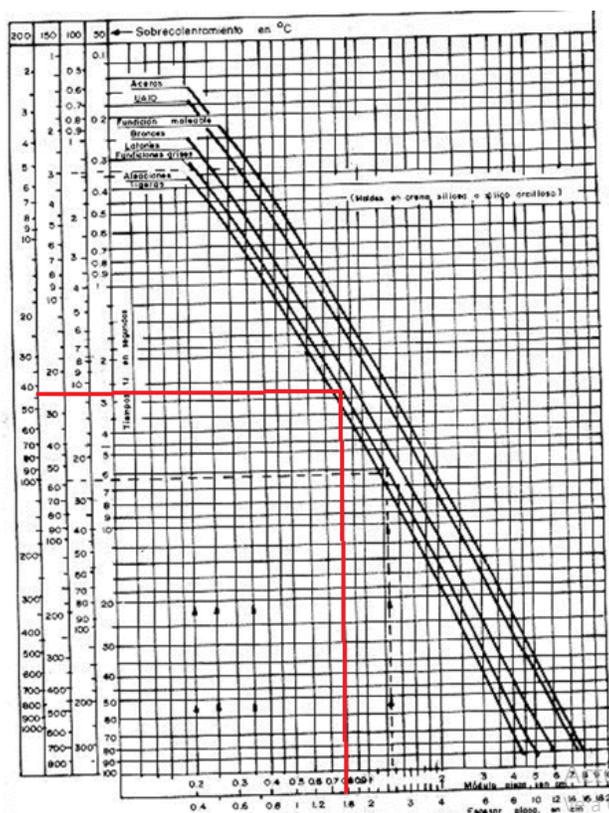
A partir del tercer molde vaciado, se observa que el tiempo de vaciado es reducido, debido a que la temperatura de la colada con el tiempo va disminuyendo, y por experiencia, los vaciadores tienden a vaciar un poco más rápido para garantizar el llenado completo de la pieza.

Es importante caracterizar con el diseño del sistema de vaciado, el correcto tiempo de llenado de las piezas y por ende la velocidad de llenado para que estos parámetros no dependan exclusivamente de la experiencia empírica del vaciador sí no que el mismo sistema de vaciado sea quien controle el llenado para garantizar unas condiciones óptimas que den como resultado un correcto llenado de las piezas.

A continuación, se calcula el tiempo de llenado en función del espesor mínimo de la pieza y la temperatura de sobrecalentamiento, para este caso el espesor mínimo de la pieza es de 1,7 cm y la temperatura de sobrecalentamiento entre 200 °C y 150 °C para las temperaturas de vaciado de 1360 °C y 1290°C respectivamente.

Figura 15

Cálculo del tiempo de vaciado para el sistema de vaciado actual.



Nota. Fuente (Montoya Alzate, 2018)

Según la lectura del gráfico, el rango del tiempo de vaciado para la pieza se encuentra para una temperatura de sobrecalentamiento de 200°C de 44 segundos y para la temperatura de sobrecalentamiento de 150°C de 26 segundos. Es evidente que al no poseer una temperatura de vaciado estandarizada para los cilindros de despulpadora 2,75·CH, el tiempo de vaciado que depende en gran medida de la temperatura de vaciado, no se tiene en cuenta por parte de los vaciadores, dando como resultado que en muchos casos por ejemplo cuando la temperatura de vaciado es baja el tiempo de vaciado que debería ser como máximo de 26 segundos, se entienda hasta el tiempo máximo promedio de vaciado de 52 segundos o de 43 segundos correspondientes a los vaciadores 1 y 2 respectivamente, esto es casi el doble del tiempo calculado para el llenado, por ende, es de esperarse que el metal se solidifique antes de tiempo y lo logre llenar por completo.

- **Falta de contrapesos**

Para el proceso de vaciado, se disponen de contrapesos que se sitúan en la parte superior del molde, estos cumplen con la función de impedir que la caja superior se eleve por acción de la presión metalostática ejercida por el metal en estado líquido o fundido.

En la práctica la cantidad de contrapesos que se disponen para cada uno de los moldes en arena es de 8 lingotes de hierro con un peso promedio de 20 kg cada uno, sumando en total unos 160 kg.

Según la experiencia de los vaciadores, es muy habitual que se escurra el metal líquido por la línea de partición de los moldes a la hora de ser vaciados, generando una descompensación del metal líquido dentro del molde que no logra llenar la pieza por completo, este problema se atribuye a la falta de contrapeso que no logra contrarrestar completamente la fuerza metalostática.

Además de esto, también se ha observado un problema con las chaquetas o camisas que son utilizadas para este tamaño de molde, en contexto las chaquetas o camisas son utilizadas en la fundición para servir como elemento de refuerzo frente a los esfuerzos a los que ve sometido el molde de arena al momento de verter en metal líquido en su interior, los gases que se generan en su interior del molde tienden a querer salir entre cada uno de los espacios, por ende, es importante que estos elementos entren lo más ajustados posibles a los moldes, de esta forma se garantiza un buen refuerzo, en nuestro caso las chaquetas son demasiado delgadas y son hechas en aluminio, esto provoca que se deformen con el tiempo y no entren muy ajustadas, por tanto, se generan pequeños espacios entre la chaqueta y el molde dando como resultado que se permita la fuga en muchas ocasiones del metal fundido por la línea de partición que queda descubierta, siendo muy importante diseñar unas chaquetas más resistentes en otro tipo de material, por ejemplo en hierro gris.

Figura 16

Chaqueta de aluminio agrietada.

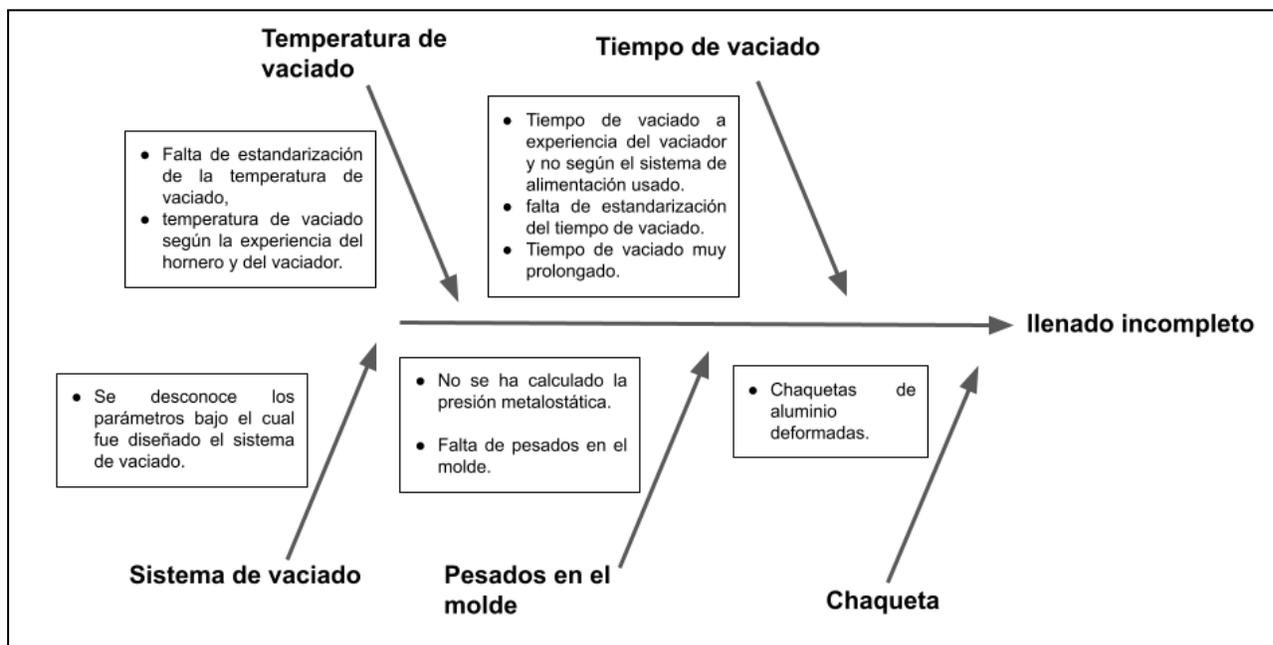


8.4. Diagrama de causalidad

En la figura 17, podemos observar un diagrama de causalidad, en el cual se tiene de forma resumida todas las variables que se identificaron en la aparición del defecto de llenado incompleto para los cilindros 2,75 3CH.

Figura 17

Diagrama de causalidad.



8.5. Acciones correctivas

8.5.1. Diseño del sistema de vaciado

Para el diseño del sistema de vaciado, primero es muy importante obtener el volumen y el área superficial de la pieza a alimentar:

por medio del software de diseño Autocad 2023, se obtuvo el valor del volumen y el área superficial de la pieza, dando como resultado los siguientes valores:

Tabla 7

Volumen y área superficial de la pieza a fabricar.

Datos	Cilindro 2,75 3CH	2 piezas por placa
Volumen (cm ³)	2721,9	5443,82
Área superficial (cm ²)	3487,6	6975,32

Después de conocer el volumen total a vaciar y el área superficial del cilindro, podemos calcular el módulo de solidificación, el cual nos permitirá calcular el tiempo de llenado de la pieza, dicho módulo está determinado por la siguiente ecuación:

$$Ms = \frac{V}{AT}$$

Donde:

Ms= Módulo de solidificación (cm)

V= Volumen de la pieza (cm³)

AT= Área superficial de la pieza (cm²)

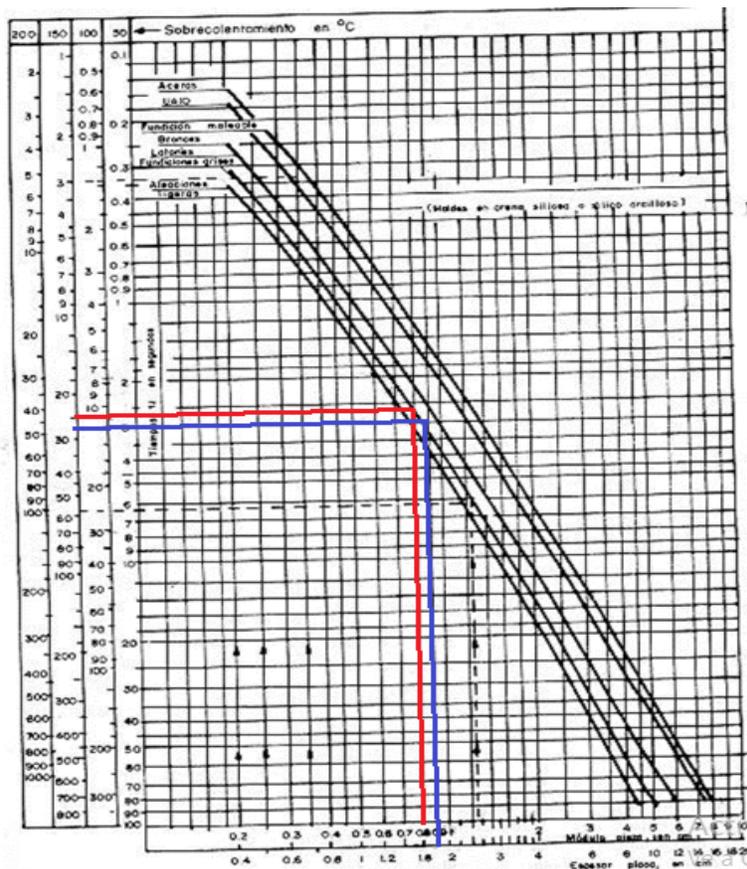
$$Ms = \frac{2721,9 \text{ cm}^3}{3487,6 \text{ cm}^2}$$

$$Ms = 0,78 \text{ cm}$$

Conociendo el módulo de enfriamiento/solidificación de la pieza, podemos identificar en la figura 18 el tiempo de vaciado y la temperatura de vaciado.

Figura 18.

Cálculo del tiempo de vaciado para el nuevo sistema de vaciado.



Nota. Fuente (Montoya Alzate, 2018).

En la figura 18, se puede observar que al ubicarnos en la línea del módulo de enfriamiento/solidificación, el valor calculado anteriormente, se obtiene un tiempo de vaciado en segundos de aproximadamente 26 segundos cuando se tiene una temperatura de sobrecalentamiento más baja, con el fin de disminuir el escurrimiento del metal líquido por en medio del molde de arena, siendo esta temperatura de sobrecalentamiento de 150 °C (ver línea roja), de forma análoga también se procedió a calcular el tiempo de vaciado y la temperatura de sobrecalentamiento con el espesor mínimo de la pieza, el cual es el grosor del cilindro que es de

1,7 cm, con este valor se obtuvo un tiempo de vaciado aproximado de 27 segundos con una temperatura de sobrecalentamiento de 150°C (ver línea azul), esto muestra concordancia en el cálculo del módulo de enfriamiento/solidificación que ambos datos son coherentes entre sí y de que al disminuir la temperatura de vaciado el tiempo de vaciado por ende debe ser más rápido.

El paso que sigue para continuar con el diseño del sistema de vaciado, es calcular la altura metalostática de la pieza a fundir, como en este caso el vaciado se realizará por la línea de partición, la altura metalostática estará determinada por la siguiente ecuación:

$$h = H - \frac{P^2}{2C}$$

Donde:

h= Altura metalostática (cm)

H= Altura caja superior(cm)

P= Altura del modelo en la caja superior (cm)

C= Altura del modelo (cm)

$$h = 18,5 \text{ cm} - \frac{(8\text{cm})^2}{2(8 \text{ cm})}$$

$$h = 16,5 \text{ cm}$$

Conociendo hasta ahora el volumen total a vaciar, el tiempo de vaciado y la altura metalostática, se puede calcular la sección de control en nuestro diseño del sistema de vaciado, la cual está determinada por la siguiente ecuación:

$$Sc = \frac{V*F}{t\sqrt{2*g*h}}$$

donde:

Sc: sección de control (cm²)

V: volumen a vaciar (g/cm³)

F: Factor de pérdidas (1,14 para bajantes ahusados redondos)

t: Tiempo de llenado (segundos)

g: Gravedad (980 cm/s²)

h: Altura metalostática (cm)

$$Sc = \frac{V*F}{t\sqrt{2*g*h}}$$

$$Sc = \frac{(5443,82 \text{ cm}^3)*(2.14)}{26s\sqrt{2*(980 \text{ cm/s}^2)*(16,5 \text{ cm})}}$$

$$Sc = 2,5 \text{ cm}^2$$

Para seguir calculando el sistema de vaciado para los cilindros, es importante recordar que el propósito es diseñar un sistema de vaciado que sea despresurizado que permita facilitar el flujo laminar y así eliminar la mayor turbulencia posible como también la inclusión de aire en el flujo del metal líquido, dicho esto la relación a utilizar será la siguiente:

Tabla 8

Relaciones de colada del nuevo sistema de vaciado.

Relación de colada	
(As : Ac: Au)	
1 : 4 : 4	
Área inferior del bajante	$2,5 \text{ cm}^2$
Área canal de distribución	10 cm^2
Área canal de alimentación o ataques	10 cm^2

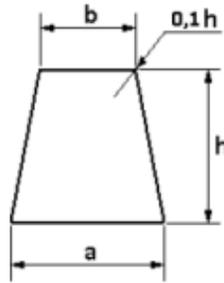
Canal de distribución

Para calcular las dimensiones del canal de distribución se inicia de las recomendaciones de la American Foundry Society (AFS), donde recomienda para las dimensiones del canal de distribución una geometría rectangular con ángulo de salida con una misma longitud del ancho y la altura del canal, lo cual proporciona una menor pérdida de temperatura durante el vaciado y

una mejor flotación de la escoria, además de esto también sugiere la implementación de canales de distribución escalonados, ya que estos proporcionan un llenado del metal líquido en la pieza más uniforme (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

Figura 19

Geometría del canal de distribución.



Nota. Fuente (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

Canal inicial de distribución.

Para $a = h$ y con un área transversal de 10 cm^2 y contando con dos canales de distribución, se tienen las siguientes dimensiones:

$$\text{Área del canal de distribución} = 10 \text{ cm}^2 / 2 = 5 \text{ cm}^2$$

$$a = 2,4 \text{ cm}$$

$$h = 2,3 \text{ cm}$$

$$b = 2 \text{ cm}$$

Canal escalonado de distribución.

Como son dos ataques por cilindro, el área transversal del canal de distribución es reducido en un 50% después de cada ataque.

$$\text{Área del canal de distribución} = 2,5 \text{ cm}^2$$

$$a = 2,3 \text{ cm}$$

$$h = 1,1 \text{ cm}$$

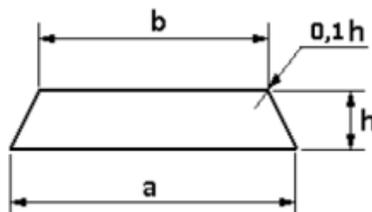
$$b = 2,15 \text{ cm}$$

Canal de alimentación o Ataques

Para el diseño de los canales de alimentación o ataques, se va a dividir el área total del canal de alimentación entre 8 que será el número de ataques totales, 4 ataques por cilindro, para un total de 8, en el diseño de estos canales bajo la sugerencia de la AFS la relación en las medidas entre el ancho y el alto del ataque debe seguir una relación igual a 4 para facilitar la fractura del ataque en el desmoldeo al igual que su geometría sea rectangular con ángulo de salida (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

Figura 20

Geometría del canal de alimentación



Nota. Fuente (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

$$\text{Área del canal de alimentación} = 10 \text{ cm}^2 / 8 = 1,25 \text{ cm}^2$$

Recomendación de la AFS, $a/h=4$

$$a = 2.4 \text{ cm}$$

$$h = 0,6 \text{ cm}$$

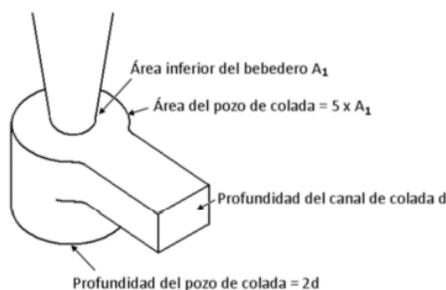
$$b = 1,8 \text{ cm}$$

Pozo de colado

Para el diseño del pozo de colado, es importante tener en cuenta que la geometría que de base del pozo de colado debe ser plana, esto se debe a la alta velocidad de caída del metal líquido por acción de la gravedad que al chocar con una superficie cóncava aumenta la turbulencia del fluido, de forma muy similar a como lo hace una cuchara cuando se mantiene bajo un chorro de agua, de aquí la importancia que su base sea plana (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

Figura 20

Geometría del poco de colado



Nota. Fuente (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

$$\begin{aligned} \text{Área pozo de colada} &= 2.5 \text{ cm}^2 * 5 = 12,5 \text{ cm}^2 \\ \text{Radio pozo de colada} &= R = \sqrt{\frac{\text{Área pozo de colada}}{\pi}} = 1,99 \text{ cm} \\ \text{Altura pozo de colada} &= 2 * 2,3 \text{ cm} = 4,6 \text{ cm} \end{aligned}$$

Taza de colado

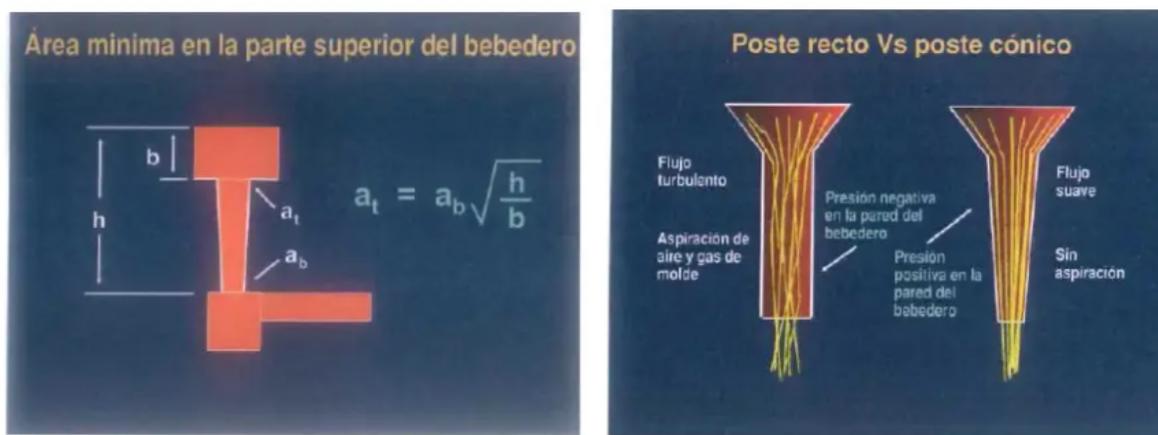
Para el diseño de la copa de vaciado, según la AFS no es una pieza cuyo diseño sea de mucha relevancia (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011), por lo tanto, la tasa de colado para este nuevo sistema de vaciado es el mismo.

Bajante

Para el diseño del bajante es importante recordar que una de las mejoras con respecto al diseño del sistema de vaciado anterior es implementar un bajante ahusado, este permite reducir las turbulencias y las aspiraciones de aire y gas (Titov & Stepanov, 1981, 156-158)

Figura 21

Izquierda) Ilustración de un bajante. Derecha) Diferencia entre bajantes rectos y cónicos.



Nota. Fuente (American Foundry Society. Cast Iron Division, 2011).

$$\text{Área sección de control} = 2,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Radio inferior del bajante} = R = \sqrt{\frac{\text{Área sección de control}}{\pi}} = 0,9 \text{ cm}$$

$$h = 18,5 \text{ cm}$$

$$b = 6,2 \text{ cm}$$

$$\text{Área superior mínima del bajante} = \text{Área sección de control} * \sqrt{\frac{h}{b}} = 4,31 \text{ cm}^2$$

$$\text{Radio superior mínima del bajante} = R = \sqrt{\frac{\text{Área superior del bajante}}{\pi}} = 1,17 \text{ cm}$$

Modificaciones al diseño del sistema de vaciado

Es importante decir que para el diseño del bajante, al ser utilizado en una prensa semiautomática, este no permite por la forma de operación de la prensa, usar bajantes ahusados,

dicho de otra manera que tengan un diámetro superior mayor que el inferior debido a que todo el sistema de vaciado se imprime de tal forma que no hay manera de retirar el modelo sin que se destruya el terrón, es decir, intentar sacar un cono impreso en arena por el lado contrario, por ende los bajantes tienen que ser rectos o que tengan el diámetro inferior un poco mayor al diámetro superior, dando como resultado un ángulo de salida muy pequeño.

Dicho esto, se trató de dar un pequeño ángulo de salida al bajante disminuyendo el diámetro superior del bajante en 1 mm, siendo lo más aproximado a una geometría de bajante recto.

Desafortunadamente este diseño del sistema de vaciado no se pudo fabricar por cuestiones de ausentismo laboral del modelista de la empresa, por tanto se propone su implementación en un futuro cercano, sin embargo, según la AFS es muy importante a la hora de vaciar el metal líquido en el molde de arena, garantizar siempre que la taza de vaciado se mantenga llena, esto asegura que la presión metalostática sea efectiva y pueda permitir que el metal líquido llene por completo el interior del molde de arena, por ende, se realizó una modificación en las áreas transversales del sistema de vaciado antiguo, específicamente en el área transversal del canal estrangulado, ya que es mucho más fácil de modificar que el bajante, pasando de un área transversal inicial de 10,44 cm² a 2,5 cm², siendo esta área transversal quién controla el llenado del metal fundido en el molde y dicha área de control fue calculada en el diseño del sistema de vaciado que no se pudo probar.

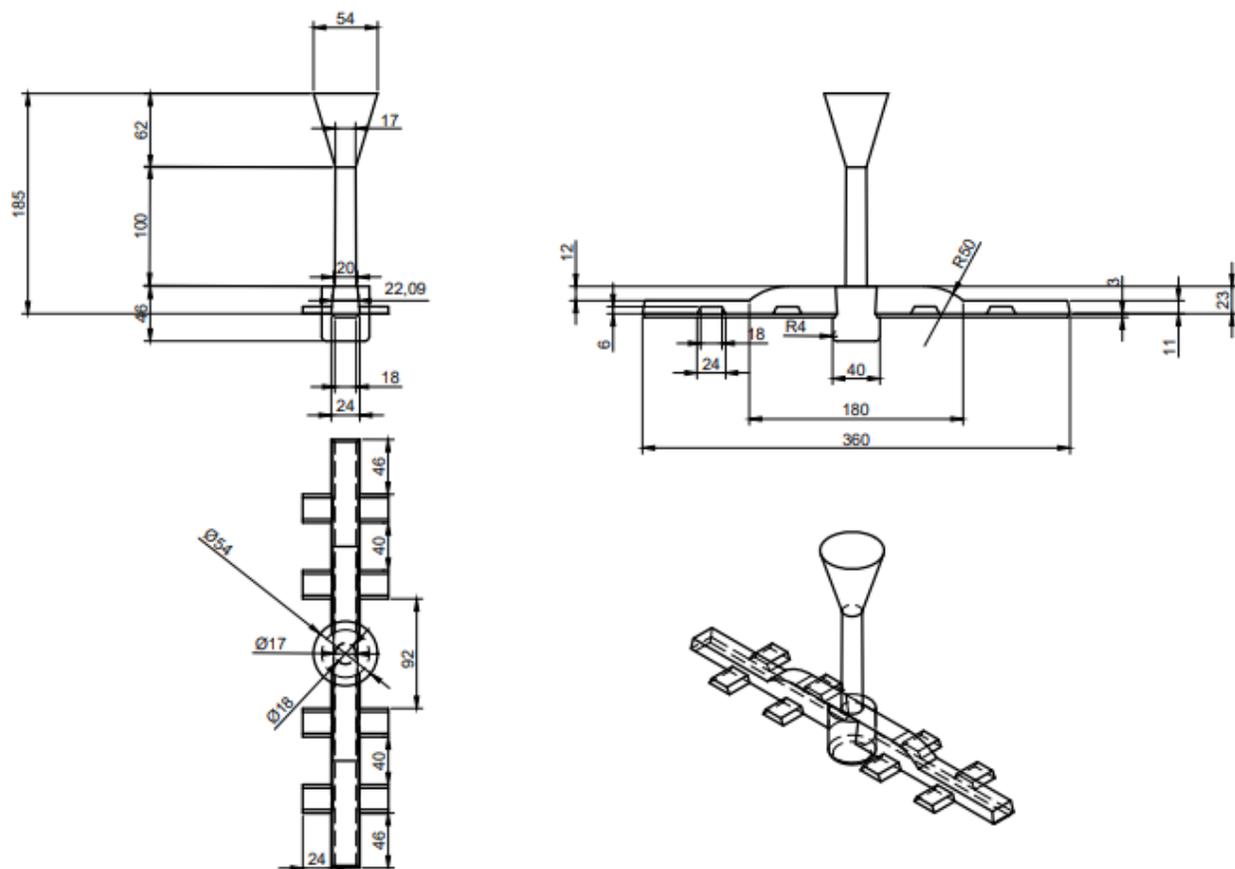
Figura 22

Estrangulamiento del canal de distribución antes y después.



Figura 23

Dimensiones en mm del diseño del sistema de vaciado del cilindro 2,75 3CH.



8.5.2. Cálculo de la cantidad de kg para el pesado

A continuación se procede a calcular de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2, el peso adecuado de los pesados:

$$F_p(Kgf) = \frac{1608,5 \text{ cm}^2 * 12 \text{ cm} * 7,3 \text{ g/cm}^3 * 1,2}{1000} = 169,08 \text{ kgf}$$

$$F_m(Kgf) = 3,5 * 16,2 \text{ Kgf} = 56,8 \text{ Kgf}$$

De tal forma que el peso total que debe tener el contrapeso es la sumatoria del cálculo de la fuerza de empuje que genera el metal líquido y la fuerza de empuje que genera el matacho o núcleo hacia la caja superior, dando como resultado un total de 225,88 kgf.

Si comparamos el valor real del cual se disponen los pesados para el vaciado, se observa que es demasiado bajo en relación con el peso teórico calculado para los pesados, contando con aproximadamente 65 Kgf por encima, esto tiene mucho sentido si tenemos en cuenta que es muy habitual que a la hora del vaciado, los contrapesos no pueden asegurar que el metal líquido se escurra por en medio del molde de arena, siendo esto una posible causa de lo que ocurre.

Anteriormente se ha calculado el peso correcto para los pesados de tal manera que garantice al menos teóricamente la presión metalostática ejercida por el metal fundido para que no sea capaz de levantar la caja superior del molde y genere la fuga o pérdida de material, por tanto, una acción correctiva para lo que sucede, es aumentar el número de contrapesos, pasando de 8 lingotes de 20 kg cada uno, a 11 lingotes del mismo peso, lo cual permite obtener un peso total de 220 kg.

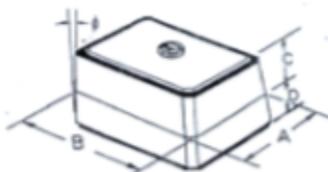
8.5.3. Diseño de chaqueta

Para el diseño de la nueva chaqueta para la máquina semi automática de prensado HUNTER, se tomaron como base los planos donde se indican las dimensiones de los moldes, el cual se puede ver en la figura 24 señalados en el recuadro rojo:

Figura 24

Dimensiones del modelo de arena para la HUNTER.

HUNTER MOLDING MACHINE
(Mold Sizes, Mold Weights, & Sand Requirements)



Hunter Model	Mold Size				Flask Taper *	Molds Per Hour		Weight per Mold in: Pounds ----- Kilograms	Sand Requirements in Tons per Hour
	Inches A ----- mm (Width)	Inches B ----- mm (Length)	Inches C ----- mm	Inches D ----- mm		Maximum Output	Usual Range		
HMP-10E	14" ----- 355	19" ----- 483	5-1/2" ----- 140	4-1/2" ----- 114	4°	180	120 - 155	150 Lbs. ----- 68 Kg.	9 - 12
HMP-10G	14" ----- 355	19" ----- 483	5-1/2" ----- 140	4-1/2" ----- 114	4°	200	130 - 170	150 Lbs. ----- 68 Kg.	10 - 13
HMP-20G/H (Shallow)	20" ----- 508	24" ----- 610	6-1/2" ----- 165	5-1/2" ----- 140	4°	150	100 - 130	330 Lbs. ----- 150 Kg.	17 - 22
HMP-20G/H (Deep)	20" ----- 508	24" ----- 610	8-1/2" ----- 216	7-1/2" ----- 190	4°	140	90 - 120	440 Lbs. ----- 200 Kg.	20 - 27
HMP-32E (Shallow)	30" ----- 762	32" ----- 813	9-1/2" ----- 241	8-1/2" ----- 216	2-1/2°	100	85 - 85	1000 Lbs. ----- 455 Kg.	33 - 43
HMP-32E (Deep)	30" ----- 762	32" ----- 813	12" ----- 305	11" ----- 279	2-1/2°	90	60 - 75	1280 Lbs. ----- 582 Kg.	39 - 48

Notes: Production rates shown are based on machine cycle times, excluding any delays such as coresetting. Weight per mold can vary depending on changes in sand compactability and mold cavity size. Sand requirements are calculated based on no mold cavity, which then allows for 5% to 7% spill sand. Sand requirements are based on molds per hour in the usual operating range.

GI-20EGH (04/01/98)

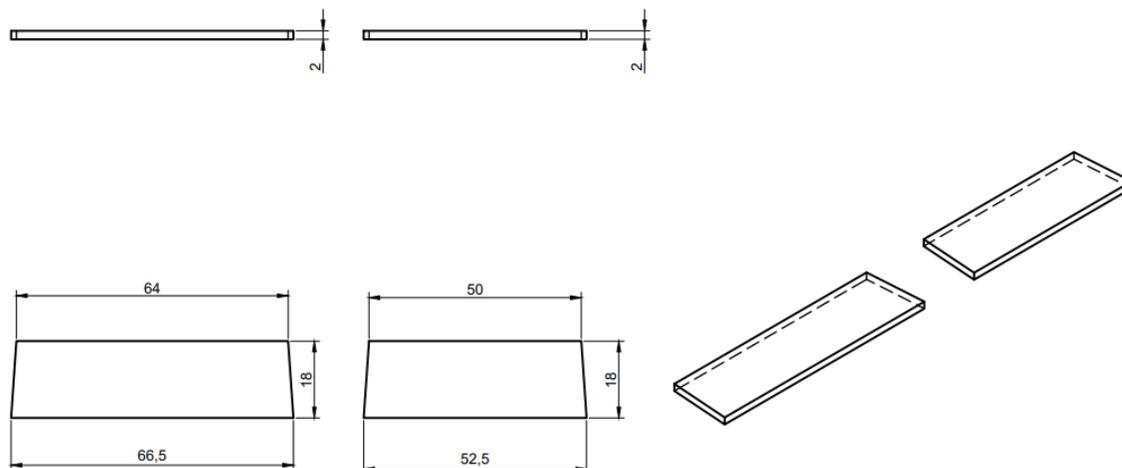
Nota. Fuente (Hunter foundry machinery corporation, 1998).

De acuerdo a las dimensiones del molde reportadas en la figura mostrada anteriormente, se procedió a realizar un modelo en madera del molde de arena, para así posteriormente realizar otro modelo en madera de la chaqueta garantizando que esta quede de forma ajustada en el molde de arena y así finalmente poder fundir las partes y ensamblarlas.

Las dimensiones de cada una de las partes de la chaqueta, son las siguientes:

Figura 25

Medidas en cm de las partes de la chaqueta.

**Figura 26**

Izquierda) fabricación del modelo de madera tanto del molde de arena como de la chaqueta.

Medio) revisión de las medidas del modelo de madera de la chaqueta en el molde de arena.

Derecha) Fabricación de la chaqueta.



8.6. Implementación de las acciones correctivas

En el siguiente apartado se evaluarán todas las acciones correctivas propuestas hasta el momento, con el fin de conocer el impacto que tendrán en los indicadores del PNC, de tal modo que serán efectivas todas aquellas que logren reducir dicho indicador, siendo este el objetivo principal del presente trabajo.

8.6.1. Sistema de vaciado

Para verificar la modificación en el área de control del sistema de vaciado antiguo con base en los cálculos del diseño del nuevo sistema de vaciado que no se pudo probar, se hicieron 10 moldes, para un total de 20 piezas, importante mencionar que la temperatura de vaciado es la que se estimó para el nuevo diseño del sistema de vaciado, la cantidad de pesados no se aumentó y la chaqueta a utilizar es la antigua de aluminio los resultados son los siguientes:

Tabla 9

Resultados de la nueva área de control con 160 kg de pesados y con chaqueta antigua.

Vaciador no. 1			Vaciador no. 2		
No. pieza	Resultado	Tiempo de vaciado (seg)	No. pieza	Resultado	Tiempo de vaciado (seg)
1	Bueno	27,34	11	Bueno	27,41
2	Bueno		12	Malo	
3	Bueno	28,89	13	Bueno	31,34
4	Bueno		14	Malo	
5	Bueno	30,48	15	Bueno	30,23
6	Bueno		16	Bueno	
7	Bueno	29,34	17	Bueno	31,54
8	Bueno		18	Bueno	
9	Bueno	32,67	19	Bueno	32,12
10	Bueno		20	Bueno	

Figura 27

Ilustración del ensayo con la nueva área de control con 160 kg de pesados y con chaqueta antigua.

**8.6.2. Aumento de pesados junto con chaqueta diseñada**

Una vez terminada la chaqueta, se procedió a realizar un nuevo ensayo donde se hicieron 20 moldes, todos los moldes pesados con el peso calculado anteriormente de 220kg, ambos ensayos con la nueva chaqueta, con la misma temperatura de sobrecalentamiento y con las modificaciones en el área transversal del sistema de vaciado antiguo para ver de manera comparativa los resultados con el ensayo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 10

Resultados del ensayo del uso de 220 kg de pesados junto con chaqueta nueva.

Vaciador no. 1			Vaciador no. 2		
No. pieza	Resultado	Tiempo de vaciado (seg)	No. pieza	Resultado	Tiempo de vaciado (seg)
1	Bueno	27,49	11	Bueno	28,1
2	Bueno		12	Bueno	
3	Bueno		13	Bueno	

28,27

31,05

DIAGNÓSTICO DE LAS CAUSAS DEL LLENADO INCOMPLETO EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN.

4	Bueno		14	Bueno	
5	Bueno		15	Bueno	
6	Bueno	29,73	16	Bueno	29,78
7	Bueno		17	Bueno	
8	Bueno	30,12	18	Bueno	31,49
9	Bueno		19	Bueno	
10	Bueno	31,58	20	Malo	30,47

Figura 28

Ilustración del uso de los pesados junto con la nueva chaqueta y el resultado al desterronar los moldes.



9. Análisis de resultados

Del ensayo realizado para la evaluación de la modificación del sistema de vaciado, se logró mantener la taza de colado llena de metal líquido, como resultado del estrangulamiento del canal de distribución del sistema de vaciado antiguo con base en los cálculos del diseño del nuevo sistema de vaciado, permitiendo en paralelo lograr el tiempo de llenado de metal líquido dentro del molde que se había calculado, obteniendo un promedio de vaciado de 29,72 segundos y 30,52 segundos con una diferencia entre ambos vaciadores del 0,8 segundos en comparación con los datos del tiempo de vaciado mostrados en la tabla 7, registrando 49,7 segundos y 42 segundos con una diferencia del 7,7 segundos del primer y segundo vaciador respectivamente, esto nos indica que la velocidad de vaciado ya no depende exclusivamente del conocimiento empírico del vaciador y por lo contrario ya es controlado por el sistema de vaciado.

Al desterronar los 10 moldes después de vaciado, como consecuencia de la falta de pesados en este ensayo, el cual se hizo con la cantidad habitual de pesados de 160 kg, se evidenció que de los 2 moldes en los que se escurre el metal líquido, solo dos piezas no alcanzaron a llenar de forma correcta, lo cual indica que a pesar de contar con una temperatura de vaciado más baja, específicamente una temperatura de sobrecalentamiento de 150°C, por la falta de pesados se sigue evidenciando la pérdida de material fundido por escurrimiento del mismo, esto se puede evidenciar en la figura 22, donde ambas piezas en uno de sus costados cuenta con una protuberancia con una geometría plana y alargada siendo esta la parte que se sale por en medio del molde y por la parte superior de la pieza se observa una discontinuidad que resulta a raíz de la pérdida de metal líquido por la línea de partición del molde que interrumpe el llenado, lo sucedido también se ve relacionado con el uso de las chaquetas de aluminio, estas de cierta manera se deforman y se agrietan con el tiempo causando que no entren de forma ajustada y dejen de brindar el refuerzo y el sello por la línea de partición necesario para que el molde no se destruya por los esfuerzos generados por el vaciado ni se permita el escurrimiento del metal líquido.

Dicho lo anterior, al observar los datos reportados del segundo ensayo donde se evalúa la importancia de la cantidad de kilogramos en el pesado de los moldes y de la efectividad de la

nueva chaqueta más resistente, se observa que para este ensayo no se observó en ningún molde vaciado el escurrimiento de metal fundido por en medio de los moldes de arena, lo cual da como resultado que el peso extra que se añadió tuvo un impacto positivo al contrarrestar la fuerza que ejerce el metal fundido sobre la parte superior del molde a causa de la presión metalostática, al igual que la efectividad de la nueva chaqueta al sellar de forma correcta todos y cada uno de los lados del molde, especialmente por toda la línea de partición, además se observa de igual forma que en el primer ensayo, que el tiempo de llenado de los moldes es parecido independiente del vaciador, contando con un tiempo promedio de llenado del primer vaciador de 29,43 segundos y para el segundo vaciador de 30,17, lo cual nos da una diferencia entre tiempos de llenado de 0,74 segundos, dicho resultado comprueba que con la reducción del área de control en el antiguo sistema de vaciado se logra controlar de forma correcta el tiempo de llenado de las piezas.

Por otro lado, a la hora de desterronar los moldes de arena, se observó que en el último molde vaciado, una sola pieza presentó la falta de llenado (ver figura 23), lo cual nos conduce a pensar que la causa del defecto fue por una baja temperatura de vaciado, eso es compatible si consideramos que para el área de control calculada de $2,5 \text{ cm}^2$ el tiempo de llenado es de 26 segundos aproximadamente y el tiempo promedio de vaciado reportado en el primer ensayo es de 30,12 segundos, no es muy superior, pero posiblemente se tenga que agrandar un poco más el área de control para permitir reducir esos segundos extras de vaciado, por otro lado, si se tiene en cuenta las pérdidas de temperatura en el vaciado entre molde y molde, a la hora de llegar al quinto molde que es la capacidad de vaciado que tiene el coco de vaciado, es posible que se cuente con una temperatura por debajo de la necesaria para vaciar, este análisis tiene mucha veracidad si analizamos los tiempos de vaciado reportados por ambos vaciadores tanto en el primer como segundo ensayo, se observa un aumento en el tiempo de llenado entre el primer y el último molde vaciado, esto da a entender que al ir perdiendo temperatura, la fluidez del metal líquido se va reduciendo, impidiendo el flujo por el sistema de vaciado hasta la pieza, por ende, como acción correctiva es importante acortar los tiempos de traslado del coco de vaciado entre molde y molde en la zona de vaciado y/o aumentar un poco el área de control que regula el llenado de la pieza para evitar estos problemas y minimizar el rechazo.

Finalmente, después de evaluar las acciones correctivas tomadas, los resultados obtenidos por medio del sistema de gestión de calidad, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 11

Análisis comparativo del PNC del defecto de llenado incompleto para los cilindros 2,75 3CH.

PORCENTAJE DE RECHAZO ENTRE ENERO Y SEPTIEMBRE - AÑO 2022			
Pieza fundición	Piezas fabricadas	Piezas rechazadas	% Rechazo
CILINDRO 2,753CH	1762	316	17,93 %
PORCENTAJE DE RECHAZO ENTRE OCTUBRE Y DICIEMBRE - AÑO 2022			
Pieza fundición	Piezas fabricadas	Piezas rechazadas	% Rechazo
CILINDRO 2,753CH	571	32	5,60 %
REDUCCIÓN DEL % DE RECHAZO		12,33%	

Se observa que para mediados de enero y septiembre el rechazo total asociado al defecto de llenado incompleto para los cilindros 2,75 3CH, fue de 17,93% como lo fue reportado anteriormente y después de las acciones correctivas ejecutadas en el periodo de octubre hasta diciembre el rechazo se redujo a 5,6% , de lo cual se puede afirmar que la reducción del porcentaje de rechazo para el cilindro es del 12,33%, lo cual da por hecho la efectividad de las acciones correctivas y el cumplimiento del objetivo principal del trabajo propuesto en reducir el producto no conforme.

Por último se hizo una reunión con todo el personal implicado en la fabricación de los cilindros 2,75 3CH, horneros, operador de la Hunter, matacheros y vaciadores, con el propósito de exponer con ellos los resultados positivos obtenidos en el presente trabajo, con el fin de generar conciencia y que todos y cada uno de ellos tenga presente el porqué de cada uno de los cambios realizados y de cómo estos tienen un impacto positivo en la calidad final de los cilindros 2,75 3 CH, esto hace de forma más amena que se pueda estandarizar los nuevos cambios para el bien de la producción en la empresa y se sigan replicando los resultados positivos.

10. Conclusiones

En JM ESTRADA S.A se presentan muchos problemas relacionados con la calidad de la fundición en sus diferentes tipos de productos, siendo el defecto de llenado incompleto el que más porcentaje de rechazo tiene. Desde la Ingeniería de Materiales se puede contribuir con la reducción de estos problemas de calidad, un ejemplo de lo anterior dicho fue la presencia del practicante en la proposición de acciones correctivas que permitan disminuir el porcentaje de rechazo en los Cilindros de despulpadora 2,75 3 CH por el defecto de llenado incompleto que hace parte del equipo más fabricado y vendido en la empresa.

Se observó que el ciclo PHVA es un procedimiento idóneo, que puede ser fácilmente aplicado. Esta metodología ofrece la capacidad de dividir un proceso o proyecto en 4 etapas diferentes que llevan a la comprensión, generación de ideas, desarrollo y creación de propuestas para dar solución a un problema en específico.

Por medio de la herramienta del sistema de gestión de calidad, se pudo identificar de forma precisa las piezas de fundición más afectadas por el defecto de llenado incompleto, logrando atacar la pieza más crítica, esta herramienta tiene un gran potencial para seguir diagnosticando los problemas de calidad en la fundición de la empresa, sin embargo, aún tiene muchas falencias debido a lo recién implementada y le esperan muchas mejoras en el futuro.

En este proceso de aprendizaje, fue posible identificar las causas que ocasionan el llenado incompleto de los cilindros 2,75 3CH, esto fue posible gracias al acompañamiento cercano de todo el proceso de inicio a fin de la fabricación de estas piezas por parte del practicante y también por la valiosa información suministrada por los operarios, donde se lograron identificar 4 variables, las cuales fueron : Sistema de vaciado, temperatura de vaciado, tiempo de vaciado, falta de pesados y falta de resistencia en las chaquetas.

Se realizó un diagrama de causalidad una vez fueron identificadas las variables implicadas en la aparición del defecto de llenado incompleto, donde se propusieron sus respectivas acciones correctivas, que en la práctica resultaron muy acertadas teniendo en cuenta que el porcentaje de rechazo de los cilindros 2,75 3 CH bajó un 12,33% en un periodo de tiempo comprendido entre octubre y diciembre en comparación en lo que se llevaba del año 2022.

11. Recomendaciones

Se recomienda en un futuro la implementación del sistema de vaciado para los cilindros 2,75 3 CH que fue diseñado bajo la norma American Foundry Society (AFS) y que no se pudo fabricar debido al ausentismo laboral del modelista de la empresa JM ESTRADA S.A.

Se recomienda extrapolar las acciones correctivas tomadas para la mitigación del producto no conforme generado por el defecto de llenado incompleto para las demás piezas que de forma similar tengan un porcentaje de rechazo alto, un claro ejemplo, bajo el análisis del sistema de gestión de calidad, es en un futuro atacar las siguientes piezas: Volante 17” y el Cilindro 2,5 que cuentan con un porcentaje de rechazo de 12,96% y 5,97 % respectivamente.

Se recomienda verificar constantemente la implementación de las acciones correctivas para que se garanticen los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Se recomienda seguir en la búsqueda de nuevas acciones correctivas para dar continuidad al proceso de mitigación del producto no conforme en los cilindros 2,75 3CH.

12. Referencias

- Aluminio de Galicia S.A. (n.d.). Técnicas manuales para el moldeo del aluminio. 15-16.
- American Foundry Society. Cast Iron División. (2011). *Principios básicos del diseño del diseño de canales de colada y alimentación de las piezas fundidas* (2nd ed.). AFS.
- Benavidez, J. R. (2011). *Estudio de la solidificación de un hierro nodular*. Retrieved November 11, 2022, from <https://cd.dgb.uanl.mx/bitstream/handle/201504211/5242/20457.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Goyo Perez, L. (2010). *Tecnología de la fundición 2*.
- Herrera, J. D. (1991). *Control de la porosidad en las piezas coladas: Análisis y experimentación con aleación a base de aluminio*. Quito, Ecuador.
- Hunter foundry machinery corporation. (1998). *Hunter molding machine manual* (1st ed.). Hunter foundry machinery corporation.
- ISO 9001. (2022). ISO 9001 y el ciclo PHVA. Retrieved December 10, 2022, from <https://www.nueva-iso-9001-2015.com/2022/07/ciclo-phva-en-iso-9001/>
- ISOTools. (2015). ¿En qué consiste el ciclo PHVA de mejora continua? Retrieved December 10, 2022, from <https://www.isotools.org/2015/02/20/en-que-consiste-el-ciclo-phva-de-mejora-continua/>
- Montoya Alzate, S. (2018). *Efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación sobre la calidad de dos componentes fundidos en arena*. Retrieved December 12, 2022, from <https://core.ac.uk/download/pdf/232126714.pdf>
- Sanchez, Y. P. (2022). *Ciclo PHVA*. Gerencie.com. Retrieved December 10, 2022, from <https://www.gerencie.com/ciclo-phva.html>

Serrano Lledó, R. (n.d.). *DEFECTOS EN LAS PIEZAS FUNDIDAS*. Raquel Serrano Lledó.

Retrieved November 11, 2022, from

http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos_Fundicion_9.pdf

Streeter, V. L., & Wylie, B. (2000). *Mecánica de fluidos* (Octava ed.). MCGRAW HILL.

<https://pdfslide.net/documents/mecanica-de-los-fluidos-8va-edicion-victor-l-streeter-e-benjamin.html?page=1>

Titov, N., & Stepanov, U. (1981). Sistemas de vaciado. In *Tecnología del proceso de fundición* (148, 156-158, 392-393). Editorial MIR.